



# Modélisation de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel français

Frédéric Branger

## ► To cite this version:

Frédéric Branger. Modélisation de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel français. Etudes de l'environnement. 2011. hal-01139233

**HAL Id: hal-01139233**

**<https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01139233>**

Submitted on 3 Apr 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

BRANGER FRÉDÉRIC  
AgroParistech  
Corps des Ponts, Eaux et Forêts

Master EDDEE

---

MODÉLISATION DE LA CONSOMMATION  
D'ÉNERGIE DANS LE SECTEUR  
RÉSIDENTIEL FRANÇAIS

---

CIRE

Septembre 2011

*Tuteur* : PHILIPPE QUIRION  
*Encadrant pédagogique* : FRANCK LECOCQ

## Remerciements

Je remercie Jean-Charles Hourcade pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et Philippe Quirion mon tuteur de stage, dont les conseils ont toujours été très avisés.

Je tiens également à remercier tout particulièrement Louis-Gaëtan Giraudet. Ce mémoire n'aurait pas été le même sans son aide inépuisable et son enthousiasme communicatif.

Je remercie ensuite Céline Guivarch, qui a été ma porte d'entrée au CIRED en me permettant de décrocher ce stage, Franck Lecocq, pour avoir accepté d'être mon référent du master EDDEE et pour les conseils qu'il m'a apporté, ainsi que Pierre-André Jouvét, pour avoir accepté d'être mon évaluateur pour ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent ensuite aux personnes avec lesquelles j'ai collaboré ou qui m'ont aidé durant ce stage : Jean-Jacques Becker, Olivier Teissier et Lucile Penot-Antoniou du CGDD, Sylvain Caurila du Laboratoire d'Economie Forestière pour son aide dans la modélisation des prix du bois énergie, Benoît Allibe du CIRED grâce auquel Res-IRF peut intégrer une composante comportementale et Gaël Callonec de l'ADEME.

Je remercie également Hubert Branger et Oskar Lecuyer pour leur travail de relecture.

Enfin, je remercie mes collègues de travail, tous brillants, ouverts et sympathiques, faisant du CIRED un lieu de travail intellectuellement stimulant et surtout agréable à vivre.

# Table des matières

<b>I</b>	<b>Description du modèle Res-IRF</b>	<b>14</b>
<b>1</b>	<b>Fonctionnement</b>	<b>14</b>
1.1	Parc de logement . . . . .	14
1.2	Croissance du parc de logements/Construction neuve . . . . .	17
1.3	Bouclage macroéconomique . . . . .	19
1.4	Processus de rénovation des logements existants . . . . .	19
1.5	Lien qualité/quantité de rénovation . . . . .	23
1.6	Calibrage des coûts intangibles . . . . .	25
1.7	Evolution des coûts intangibles et des coûts de rénovation . . . . .	26
1.8	Passage consommation théorique/consommation réelle : effet rebond . . . . .	28
<b>2</b>	<b>Paramétrage des différentes politiques</b>	<b>30</b>
2.1	Crédit d'impôt développement durable (CIDD) . . . . .	30
2.2	Eco-prêt à taux zéro (EcoPTZ) . . . . .	31
2.3	Règlementation thermique pour les bâtiments neufs (RT2012 RT2020) . . . . .	31
2.4	Obligation de rénovation (OR) . . . . .	31
2.5	Taxe carbone (ou CCE Contribution Climat Energie) . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Quelques résultats du modèle pour le scenario “au fil de l'eau”</b>	<b>32</b>
<b>II</b>	<b>Analyse de sensibilité</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>Méthode</b>	<b>35</b>
4.1	Variables . . . . .	36
4.2	Variation des paramètres . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Distribution des résultats</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>Analyse de sensibilité sur les paramètres</b>	<b>41</b>
6.1	Méthode . . . . .	41
6.2	Résultats . . . . .	43
6.3	Remarques générales . . . . .	43
6.4	Inertie du taux de rénovation par rapport au taux de rénovation initial . . . . .	48
6.5	Influence des différentes courbes d'utilisation . . . . .	48
<b>7</b>	<b>Analyse de sensibilité simplifiée</b>	<b>49</b>
7.1	Paramètres et politiques . . . . .	49
7.2	Analyse de variance agrégée . . . . .	51
<b>8</b>	<b>Elasticités-prix et influence du mode d'anticipation des prix</b>	<b>53</b>
8.1	Elasticités-prix . . . . .	53
8.2	Effet des modes d'anticipation des prix . . . . .	54
<b>9</b>	<b>Conclusion de l'analyse de sensibilité</b>	<b>56</b>

<b>III</b>	<b>Analyse des résultats du modèle</b>	<b>58</b>
<b>10</b>	<b>Evaluation des politiques du Grenelle de l'environnement</b>	<b>58</b>
<b>11</b>	<b>Le bois-énergie : solution d'avenir pour la consommation d'énergie dans le résidentiel ?</b>	<b>62</b>
11.1	La forêt française : un potentiel important encore peu exploité . . . . .	62
11.2	Objectifs de développement de la filière . . . . .	63
11.3	Freins au développement du bois-énergie à grande échelle . . . . .	64
11.4	Bois-énergie dans Res-IRF . . . . .	65
11.5	Endogénéisation de l'offre de bois . . . . .	66
11.6	Consommation de bois selon différents scenarios . . . . .	67
	<b>Références</b>	<b>71</b>
<b>IV</b>	<b>Annexes</b>	<b>75</b>
<b>12</b>	<b>Mise à jour des données</b>	<b>75</b>
12.1	Parc . . . . .	75
12.2	Taux de rénovation initial . . . . .	77
12.3	Matrice de coûts de rénovation . . . . .	78
12.4	Données introduites suite à l'ajout des logements sociaux et du bois énergie	79
<b>13</b>	<b>Calibrage des coûts intangibles</b>	<b>81</b>
<b>14</b>	<b>Piste d'amélioration de la procédure de fuel switch</b>	<b>82</b>
14.1	Calibrage des coûts intangibles . . . . .	82
14.2	Evolution des coûts intangibles et des coûts de rénovation . . . . .	83

## Table des figures

1	Evolution de la consommation d'énergie selon les différents postes (base 100 en 1976) . . . . .	15
2	Parc résidentiel français (source ANAH) . . . . .	16
3	Consommations énergétiques (en kWh/m <sup>2</sup> /an) selon les classes de performance énergétique (dans les réglementations et dans Res-IRF) . . . . .	17
4	Projection du nombre de logements . . . . .	19
5	Schéma du bouclage entre Res-IRF et IMACLIM-R . . . . .	20
6	Fonction de rénovation (avec $r = 0.015$ ) . . . . .	24
7	Courbes de facteur de service . . . . .	30
8	Evolution des coûts dans le scenario BAU . . . . .	32
9	Evolution du Parc existant en scenario BAU . . . . .	33
10	Evolution de la consommation d'énergie et du facteur de service en scenario BAU . . . . .	33
11	Courbes d'utilisation utilisées dans l'analyse de sensibilité . . . . .	39
12	Histogrammes des tirages de valeurs pour les différents paramètres . . . . .	40
13	Distribution de la consommation d'énergie réelle et conventionnelle . . . . .	41
14	Résultats probabilisés : coûts de rénovation et coûts intangibles . . . . .	41
15	Résultats probabilisés : taux de rénovation . . . . .	42
16	Coefficient de variation des différents paramètres de sortie (I) . . . . .	42
17	Coefficient de variation des différentes sorties (II) . . . . .	42
18	Coefficient d'actualisation en fonction du taux d'actualisation . . . . .	46
19	Visualisation de l'impact du taux de croissance du prix des énergie et du taux de rénovation initial sur la consommation d'énergie en 2050 . . . . .	47
20	Taux de rénovation en 2020, 2035 et 2050 en fonction du taux de rénovation initial . . . . .	48
21	Moyenne et coefficient de variation de Ef pour les trois courbes d'utilisation . . . . .	49
22	Résultats de l'analyse de variance simplifiée selon les courbes de taux d'utilisation et les politiques . . . . .	51
23	Résultats de l'analyse de variance agrégée . . . . .	52
24	Coefficient $R^2$ en fonction de la moyenne des taux d'accroissement . . . . .	53
25	Elasticités-prix calculées . . . . .	54
26	Prix de l'énergie, consommations d'énergie finale réelle et conventionnelles selon différents scenarios . . . . .	55
27	Ef conventionnelle en 2050 en fonction de la moyenne des taux d'accroissement . . . . .	55
28	Consommations d'énergie sous différentes politiques . . . . .	60
29	Consommations d'énergie sous différentes politiques. Résultats supplémentaires . . . . .	61
30	Composition de la forêt française (source IFN [31]) . . . . .	62
31	Illustration du lien entre BIBE et BO (source IFN) . . . . .	63
32	Courbe d'offre du prix du bois établie en forçant le modèle FFMS du LEF . . . . .	67
33	Consommation de bois simulée dans Res-IRF et prix du bois en fonction de différents scenarios . . . . .	68
34	Consommations d'énergie et émissions de CO <sub>2</sub> selon les différents scenarios . . . . .	69

## Liste des tableaux

1	Coûts de rénovation . . . . .	21
2	Matrice de coûts de fuel switch ( $\text{€}/m^2$ ) . . . . .	23
3	Coûts de construction ( $\text{€}/m^2$ ) . . . . .	23
4	Transitions d'étiquettes "réelles", déterminées à partir de 500 opérations de rénovation prises dans le logement social (adapté de PUCA 2008 [52]) . .	25
5	Coûts intangibles dans les rénovations ( $\text{€}/m^2$ ) . . . . .	25
6	Parts de marché de la construction neuve (adapté de OPEN 2008 [49]) .	26
7	Coûts intangibles dans la construction neuve (pour un taux d'actualisation de 8%) (en $\text{€}/m^2$ ) . . . . .	26
8	Lois des paramètres servant à l'analyse de sensibilité . . . . .	38
9	Résultats analyse variance : $Ef_{conv}$ 2050 . . . . .	43
10	Résultats analyse variance : $Ef_{conv}$ 2050 . . . . .	44
11	Résultats analyse variance : Facteur service 2050 . . . . .	44
12	Résultats analyse variance : Facteur service 2020 . . . . .	44
13	Résultats analyse variance : Ef 2050 . . . . .	46
14	Résultats analyse variance : Ef 2020 . . . . .	47
15	Résultats de la régression linéaire de $Ef_{2050}$ en fonction de $\tau_{reno,ini}$ et $\tau_{croissance,éner}$ . . . . .	57
16	Comparaison des prévisions de la baisse de la consommation d'énergie finale unitaire sur le parc existant entre Res-IRF ancienne et nouvelle version .	58
17	Rénovations énergétiques dans le bâti en 2006 . . . . .	77

## Liste des notations et symboles

$\beta$  part variable des coûts intangibles  
 $CENER$  coût de l'énergie actualisé  
 $CINV$  coûts de rénovations  
 $d$  type de décideur ( $PO_{MI}$ ,  $PO_{LC}$ ,  $PB_{MI}$ ,  $PB_{LC}$  et  $LS$ )  
 $DISC$  coefficient d'actualisation  
 $e$  type d'énergie de chauffage (elec, gaz, fioul, bois)  
 $E_{conv}$  énergie finale conventionnelle (sans effet rebond)  
 $E_{fin}$  énergie finale réelle (avec effet rebond)  
 $\gamma$  taux de destruction  
 $H$  besoin en logement  
 $IC$  coûts intangibles  
 $K$  stock de capital installé  
 $l$  taux d'apprentissage  
 $LBD$  coefficient de learning-by-doing  
 $LBU$  coefficient de learning-by-using  
 $LCC$  coût total sur le cycle de vie  
 $LPH$  nombre de personnes par logement  
 $LS$  logements sociaux  
 $MI/LC$  maison individuelle/logement collectif  
 $MS$  market shares  
 $NPV$  valeur actuelle nette (ou net present value)  
 $\nu$  paramètre d'hétérogénéité des préférences  
 $p$  prix de l'énergie  
 $PO/PB$  propriétaire occupant/propriétaire bailleur  
 $q$  classe énergétique (G à A pour l'ancien, RT05, BBC et BEPOS pour le neuf)  
 $r$  paramètre de la fonction de rénovation calibré la première année  
 $\rho$  consommation théorique en kWh/m<sup>2</sup>/an  
 $S_t^{ancien}$  Stock de logement ancien (à l'année  $t$ )  
 $t$  année  
 $\tau$  fraction rénovée d'une catégorie  
 $\tau_{utilisation}$  facteur de service  
 $u$  taux d'information



## Liste des sigles

ADEME Agence nationale de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie  
AL (courbe) Ancienne logistique  
ANAH Agence nationale de l'habitat  
AME (scenario) Avec mesures existantes  
AMS (scenario) Avec mesures supplémentaires  
BAU (scenario) Business as usual  
BBC Bâtiment basse consommation  
BEPOS Bâtiment à énergie positive  
BIBE Bois industrie bois énergie  
BO Bois d'oeuvre  
CCE Contribution climat-énergie (taxe carbone)  
CGDD Conseil général du développement durable  
CSTB Centre scientifique et technique du bâtiment  
CIDD Crédit d'impôt développement durable  
CIRED Centre international de recherche sur l'environnement et le développement  
DPE Diagnostic de performance énergétique  
EC (courbe) Elasticité constante  
Eco-PTZ Eco-prêt à taux zéro  
ENR Energies renouvelables  
GES Gaz à effets de serre  
GIEC Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat  
IFN Institut forestier national  
INSEE Institut national de la statistique et des études économiques  
NL (courbe) Nouvelle logistique  
OPEN Observatoire permanent pour l'amélioration énergétique du logement  
OR Obligation de Rénovation  
PCI Pouvoir calorifique inférieur  
POPE (loi) Programmation fixant les orientations de la politique énergétique  
Res-IRF Module résidentiel d'IMACLIM-R France  
RT Règlementation thermique  
Tep Tonne équivalent pétrole

## Avertissement

*Agroparistech n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les mémoires : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.*

## Abstract

This dissertation presents the functioning, the evaluation and some results of the latest version of Res-IRF, a hybrid simulation model of heat consumption in French households developed at the CIRED.

The residential sector is considered to have the largest potential for energy consumption and greenhouse gases emissions mitigation. Modelling retrofitting and energy consumption with public policies (subventions, taxes, regulations) is therefore an important issue. Engineers bottom-up and economists top-down models fail to capture the technological and economical mechanisms of this dynamics.

Res-IRF is an innovative hybrid model developed taking into account phenomena related to energy efficiency : distinction between efficiency and sufficiency linked by the rebound effect, landlord-tenant dilemma, myopic price expectations, cost decrease through learning-by-doing...

A lot of uncertainties surrounds the design of these models. Some uncertainties are external (lack of reliable data, theoretical controversies) while others are internal (choices of the modeller to represent complex phenomena : parameters, functional forms, algorithms). As uncertainty is tricky to address, it is rarely made explicit in these models. In this dissertation, we develop an original method of parameter sensitivity analysis based on a Monte Carlo method. It allows to determine the salient parameters of our model (energy prices, utilisation curve, initial retrofit rate). After highlighting some difficulties that are inherent in this type of modeling, some improvements of the model are suggested.

These new developments confirm the previously established results : energy efficiency policies make significant reductions of energy consumption compared to the business as usual scenario, but, even if they are ambitious, don't achieve the political targets of the Grenelle (-38% of energy consumption in 2020 and -75% in 2050).

## Résumé

Ce mémoire présente le fonctionnement, l'évaluation et certains résultats issus de la dernière version de Res-IRF, modèle hybride de simulation de la consommation de chauffage en France développé au CIRED.

Le secteur du bâtiment est considéré comme le plus gros gisement d'économies d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effets de serre. Modéliser la dynamique de rénovation du parc de logements et des consommations d'énergie est donc un enjeu majeur. Les modèles d'ingénieurs bottom-up et les modèles d'économistes top-down présentent certaines limites pour représenter les mécanismes technologiques et économiques de cette dynamique.

Res-IRF est un modèle hybride innovant prenant en compte des phénomènes caractéristiques liées à l'efficacité énergétique : efficacité et sobriété distingués mais liés par le phénomène comportemental de l'effet rebond, dilemme propriétaire-locataire, anticipation myope des prix par les acteurs (rationalité limitée), décroissance des coûts par apprentissage technologique...

Un grand nombre d'incertitudes jalonnent la conception de ce type de modèles, qu'elles soient externes (données peu fiables, controverses théoriques) ou internes (choix nécessaires du modélisateur pour représenter des phénomènes complexes : paramètres, formes fonctionnelles, algorithmes). Difficile à traiter, les incertitudes sont souvent mal explicitées. Dans ce mémoire, nous développons une méthode originale d'analyse de sensibilité des paramètres basée sur une méthode de Monte Carlo. Cette dernière permet de dé-

terminer les paramètres saillants du modèle (prix de l'énergie, courbe d'utilisation, taux de rénovation initial). En révélant certaines difficultés propre à ce type de modélisation (calibrage pour reproduire des données réelles rendant le modèle trop rigide), elle suggère certaines pistes d'améliorations (lien entre la qualité et la quantité des rénovations, coûts intangibles).

Ces nouveaux développements confirment les résultats précédemment établis : les politiques promouvant l'efficacité énergétique permettent des réductions significatives de consommations d'énergie par rapport au scénario au fil de l'eau, mais ne permettent pas d'atteindre les objectifs du Grenelle (-38% de consommation d'énergie en 2020 et -75% en 2050), même lorsqu'elles sont ambitieuses.

## Introduction

Le secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire est souvent présenté comme le plus gros potentiel en termes d'économies d'énergie et d'atténuation du changement climatique. En France il compte pour 43% de la consommation d'énergie finale et 23% des émissions de gaz à effet de serre<sup>1</sup>. Pourtant les technologies récentes permettent de faire diminuer la consommation d'énergie de façon très significative : à environ 50kWh/m<sup>2</sup>/an, contre environ 240 kWh/m<sup>2</sup>/an en moyenne dans les logements actuels. Ce gisement d'économies d'énergie facilement accessible en apparence explique pourquoi ce secteur a été choisi comme fer de lance des ambitions du Grenelle, avec un objectif de -38% en 2020, contre -20% tous secteurs confondus.

La nécessité d'*atténuer le réchauffement climatique* et de *maîtriser la demande d'énergie* pour préserver les ressources naturelles, diminuer les pollutions en tous genres et garantir l'indépendance énergétique ne sont pas les seuls enjeux liés à la maîtrise de l'énergie dans le secteur résidentiel. La facture énergétique pèse lourd dans le budget des ménages, et 3.4 millions de Français vivent en situation de *précarité énergétique*<sup>2</sup> (ANAH 2009 [20]). La rénovation des bâtiments est donc aussi un levier permettant d'augmenter le *pouvoir d'achat* et le *bien-être* (confort thermique) des habitants.

Pourtant, le nombre de rénovations engagés par ces derniers est bien inférieur à l'heure actuelle à ce qu'il devrait être au regard de critères économiques simples (temps de retour sur investissement par exemple). Ce manque d'investissement dans l'efficacité énergétique, connu sous le nom d'*energy efficiency gap* dans la littérature (JAFTE et STAVINS 1994 [36]), peut être expliqué par des *barrières à l'efficacité énergétique* : information imparfaite, intérêts divergents (entre propriétaires et locataires d'un même logement), contrainte de liquidité, décisions d'investissements par des règles heuristiques ou autres critères de choix que l'efficacité énergétique.

Au-delà du manque d'*efficacité* des biens (systèmes de chauffages ou enveloppe des bâtiments) s'ajoute l'enjeu de la *sobriété* des comportements. D'une part la modification du comportement des utilisateurs peut être en soi une source d'économie d'énergie non négligeable<sup>3</sup>. D'autre part, efficacité et sobriété sont étroitement liés par l'*effet rebond* (SORRELL et DIMITROPOULOS 2008 [59]) : après travaux dans la majorité des cas, la diminution de la facture entraîne un "relâchement" de l'utilisateur qui se chauffe plus. Les économies d'énergie sont alors moins importantes que ce qui était espéré ex ante.

Les externalités négatives engendrées par la consommation d'énergie dans le bâtiment (consommation d'énergie accrue, émissions de gaz à effet de serre) et certaines barrières à l'efficacité énergétique justifient une intervention publique dans ce secteur. Dès lors, la prévision des consommations futures et l'évaluation de différentes politiques (subventions, réglementations, taxe), nécessitent des travaux de *modélisation* de ce secteur.

Jusqu'à la fin des années 90, deux types de modèles s'opposaient : les modèles bottom-up portés par les ingénieurs, et les modèles top-down portés par les économistes. L'émergence de modèle "hybrides" dans les années 2000 a permis, dans une certaine mesure, de

1. La différence entre les deux pourcentages vient du fait qu'une grande partie du parc de logements est chauffé à l'électricité, et qu'avec en moyenne 80% de l'électricité produite par énergie nucléaire, le contenu en CO<sub>2</sub> du kWh électrique est relativement faible en France.

2. Une personne est dite en situation de précarité énergétique lorsqu'elle dépense plus de 10% de ses ressources pour l'énergie dans son logement. Cette définition simple originaire de Grande-Bretagne a l'avantage de faciliter les traitements statistiques mais a le défaut de mal prendre en compte les phénomènes de restriction et de gaspillage.

3. En Californie, le simple fait de mettre sur la facture la consommation moyenne du voisinage, ainsi qu'une "incitation visuelle" (un smiley positif d'encouragement si on consomme moins, un smiley négatif si on consomme plus) a fait diminuer la consommation de 2% (ALCOTT et MULLAINATHAN 2010 [5]).

tirer parti de la spécification technologique des premiers modèles tout en gardant des mécanismes économiques des seconds (HOURCADE *et al.* 2006 [30]). Les deux spécificités des questions d’efficacité énergétique évoquées plus haut, à savoir les barrières à l’efficacité énergétique et l’effet rebond, étaient mal prises en compte dans les modèles “classiques” (ÜRGE-VORSATZ *et al.* 2009 [55], JAFFE et STAVINS 1994b [36]). Ce sont ces faiblesses que Res-IRF, modèle hybride de simulation de la consommation de chauffage en France métropolitaine développé au CIRED (GIRAUDET *et al.* 2011 [26]), essaie de dépasser, en utilisant différents leviers (coûts intangibles, taux d’actualisations différenciés, fonction d’effet rebond etc).

Une nouvelle version de ce modèle a été développée par l’auteur <sup>4</sup> grâce à (i) l’inclusion du bois énergie et des logements sociaux (ii) une mise à jour des données pour les coûts de rénovation, le parc de logement et le taux de rénovation initial (iii) un raffinement des paramètres (taux d’actualisation, fonction de rénovation, fonction de comportement de l’utilisateur).

Dans ce mémoire, nous détaillons dans un premier temps le fonctionnement de la dernière version de Res-IRF, en expliquant quelques résultats du scénario *au fil de l’eau*. Un aspect primordial pour contrôler le fonctionnement d’un modèle est de tester sa sensibilité par rapport aux différents paramètres qui le composent. C’est pourquoi une analyse de sensibilité conséquente occupe la deuxième partie. Enfin dans un dernier temps, nous complétons une analyse des politiques du Grenelle déjà réalisée par ailleurs (GIRAUDET *et al.* 2010) par une analyse approfondie de la contribution du bois énergie.

---

4. Pour voir les nouveautés par rapport à la version de GIRAUDET *et al.* 2011, voir surtout partie 12 page 75 en annexe, et parties 1.5 et 1.8, ainsi que la partie 13

## Première partie

# Description du modèle Res-IRF

Res-IRF modélise les consommations de chauffage dans le bâtiment résidentiel en France, sur une période allant de 2008 à 2050. Le chauffage représente les deux tiers de la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment résidentiel, qui lui même représente les deux tiers de la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire. Les résultats de Res-IRF peuvent alors être utilisés pour donner une indication de la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire.

Cette approximation est justifiée au moins à court et moyen terme, le chauffage (et donc l'isolation des bâtiments) étant bien l'enjeu principal de la maîtrise de l'énergie dans ce secteur et le point de focalisation des politiques à l'heure actuelle. Cependant, il ne faut perdre de vue qu'à plus long terme, dans un parc de logements efficace thermiquement, la consommation d'électricité spécifique (autre que chauffage, éclairage, eau chaude sanitaire et cuisson) occupera une place déterminante. Cette dernière a augmenté continûment depuis plusieurs années (voir figure 1), alors que les autres postes de consommation ont stagné ou diminué. L'incertitude est grande sur son évolution, l'efficacité des appareils électroniques étant plus que compensée par l'apparition de nouveaux appareils (ordinateurs, téléphones portables etc).

Autre point important à souligner : le climat est considéré comme constant dans cette modélisation (pour un type de bâtiment donné, les besoins énergétiques restent les mêmes pour toute la durée de la simulation). Un réchauffement climatique diminuerait la consommation de chauffage en hiver mais augmenterait les besoins de climatisation en été<sup>5</sup>, la balance entre les deux étant différente selon les pays<sup>6</sup> (ISAAC et VAN VUUREN 2009 [33]). En raisonnant du seul point de vue de la consommation d'énergie et des émissions de GES dans le résidentiel, il est probable qu'en France le réchauffement climatique soit bénéfique, car cela atténuerait le pic de consommation hivernal responsable de très fortes émissions de CO<sub>2</sub> (les pics de consommation sont en hiver et les centrales<sup>7</sup> utilisées "en pointe" sont les plus émettrices).

## 1 Fonctionnement

### 1.1 Parc de logement

#### 1.1.1 Caractéristiques du parc de logements français

La France comptait en 2007 31,3 millions de logements<sup>8</sup>, dont 26,2 millions de résidences principales, le reste étant des résidences secondaires et des logements vacants. Nous considérons dans Res-IRF que la consommation énergétique des résidences secondaires et des logements vacants est négligeable<sup>9</sup>, et représentons seulement les résidences

---

5. culturellement les français sont très peu consommateurs de climatisation, le marché reste important vu le faible taux d'équipement

6. l'Inde aurait une explosion de sa demande de climatiseurs par exemple, le réchauffement climatique ne faisant qu'accentuer la tendance imputable au développement économique et à l'augmentation de la population

7. on suppose donc ici que le fonctionnement des centrales ne soit pas affecté par le réchauffement climatique ce qui n'est pas le cas, notamment pour les ressources en eau

8. Comptes du Logement 2007

9. Ces dernières représentent plus de 90% de la consommation, avec 260 TWh hors bois pour 280 TWh hors bois pour l'ensemble du parc (CEREN)

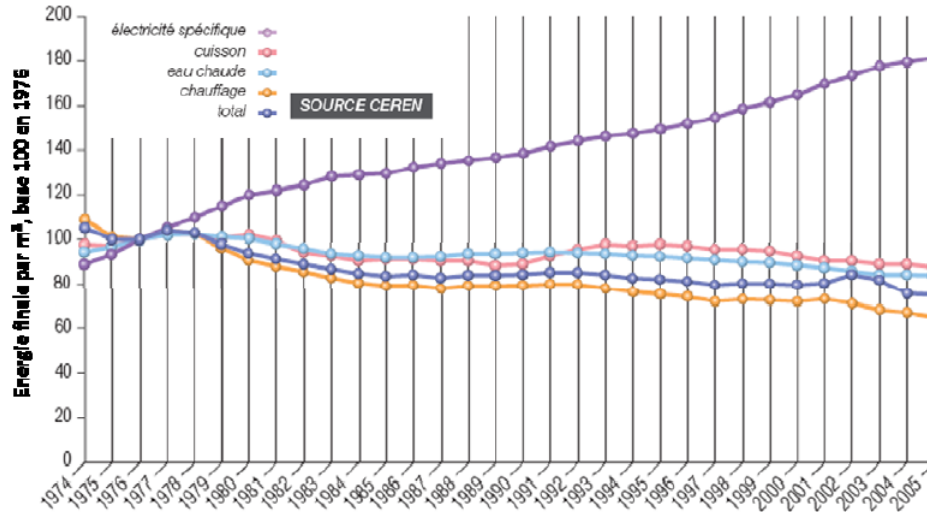


FIGURE 1 – Evolution de la consommation d’énergie selon les différents postes (base 100 en 1976)

principales.

En 2006, 14,8 millions de ces résidences principales étaient des maisons individuelles, les 11,5 millions d’autres étant des logements collectifs. 57,5% des ménages sont propriétaires en 2007 (INSEE 2009 [32]), ce qui place la France en dessous de la moyenne des pays européens<sup>10</sup>.

Le gaz naturel est la première source d’énergie de chauffage, 45% des ménages en sont équipés (ADEME 2008 [1]), principalement les logements collectifs. Une autre caractéristique du parc français par rapport à ses voisins européens liée au contexte énergétique (construction de centrales nucléaires dans les années 70 et 80 et politique d’augmentation de la demande) est la forte présence de l’électricité comme énergie de chauffage, à 29%. Le fioul équipe 19% des ménages, principalement les maisons individuelles. Enfin le bois, souvent utilisé en chauffage d’appoint, apparaît comme non négligeable, avec 3% de foyers utilisateurs. Le chauffage urbain, ainsi que le charbon, le GPL et d’autres énergies moins répandues, équiperont le reste des ménages.

### 1.1.2 Description dans Res-IRF

La représentation du parc dans Res-IRF comporte deux catégories principales : les logements construits avant 2007 ou “logements anciens”, et ceux construits après 2007 ou “logements neufs”. Même si en 2050, un logement construit en 2010 a quarante ans, il est toujours considéré comme un “logement neuf”. *Seuls les logements anciens sont susceptibles d’être rénovés*. Avec approximativement 1% du parc de logements renouvelé chaque année, les logements neufs ne représenteront environ qu’un tiers des logements en 2050, et, étant mieux isolés, une part bien plus faible de la consommation totale.

Chaque logement a trois caractéristiques :

- la *performance énergétique* (indice  $q$ ). Pour les logements anciens, elles sont au nombre de 7 : il s’agit des étiquettes de diagnostic de performance énergétique

10. qui est de 65%, à titre de comparaison ce pourcentage est de 83% en Espagne et 46% en Allemagne



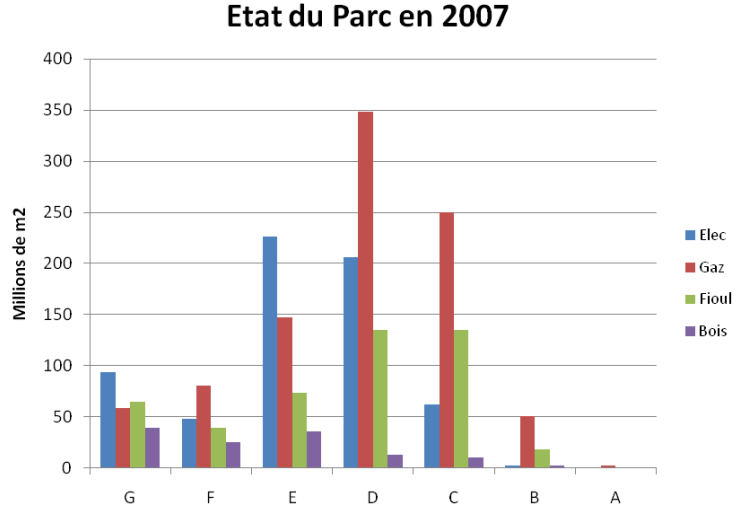


FIGURE 2 – Parc résidentiel français (source ANAH)

(DPE), allant de G (consommation annuelle théorique supérieure à  $450 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ ) à A (inférieure à  $50 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ ). Pour les logements neufs, il y en a seulement trois : RT05 (règlementation thermique de l’année 2005), BBC (bâtiment basse consommation) et BEPOS (bâtiment à énergie positive). Ces valeurs représentent la consommation d’énergie *primaire* utilisée pour le chauffage, l’eau chaude sanitaire le refroidissement et la ventilation<sup>11</sup>. Voir la figure 3 pour les valeurs réglementaires et dans Res-IRF des consommations énergétiques.

- *l’énergie de chauffage principale* (indice *e*). Il y en a quatre : électricité, gaz, fioul et bois-énergie.
- *le type de décideur* (indice *d*). Il y en a cinq : propriétaire occupant en maison individuelle ( $PO_{MI}$ ), propriétaire occupant en logements collectifs ( $PO_{LC}$ ), propriétaire bailleur en maison individuelle ( $PB_{MI}$ ), propriétaire bailleur en logement collectif ( $PB_{LC}$ ), et logement social ( $LS$ ).

La description fine du parc a été réalisée grâce à la base de données de l’ANAH (J. MARCHAL 2008 [43]). Trois points particuliers ont posé des difficultés<sup>12</sup> et des hypothèses ont dû être prises pour les résoudre au mieux (voir l’annexe partie 12.1 pour le détail). Le prochain travail de l’ANAH prévu pour la fin de l’année permettra de rafraîchir ces données.

Une représentation du parc à une année  $t$  est donc un couple de deux hypermatrices, l’une de dimensions  $7 \times 4 \times 5$  (logements anciens)  $S_t^{\text{ancien}}$  et l’autre  $S_t^{\text{neuf}}$  de dimension  $3 \times 4 \times 5$  (logements neufs). Les éléments de ces hypermatrices sont le nombre (ou la surface) des logements ayant les caractéristiques  $(q, e, d)$ .

11. Le modèle ne prenant pas en compte les autres usages que le chauffage, un coefficient de 84% (représentant la part moyenne du chauffage dans le DPE) est appliqué à ces consommations théoriques

12. Premièrement, hors logement social, pour les logements construits avant 1975 ou après 2000, on ne sait pas si le propriétaire est occupant ou bailleur. Deuxièmement concernant les énergies de chauffage, on a une segmentation par électricité, gaz, fioul et “autres” (hors logement social) et électricité, gaz et “fioul et autres” (logement social). Enfin la base de donnée de l’ANAH couvre les 31 millions de logements de France métropolitaine, sans distinguer s’il s’agit de résidences principales, secondaires, ou de logements vacants (Res-IRF ne concerne que les résidences principales).

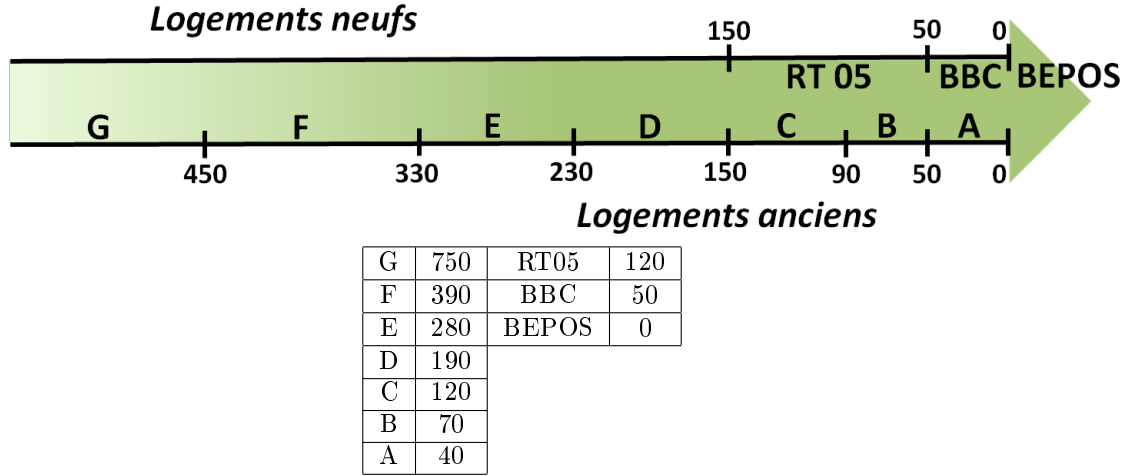


FIGURE 3 – Consommations énergétiques (en kWh/m<sup>2</sup>/an) selon les classes de performance énergétique (dans les réglementations et dans Res-IRF)

### 1.1.3 Passage d'une représentation en effectifs de logements à une représentation en surfaces

Le *nombre de logements* est l'unité adéquate pour parler de *rénovations*, tandis que lorsqu'on parle de *consommations*, ce sont les *surfaces* qui sont pertinentes.

Il est donc nécessaire de pouvoir jongler entre une représentation du parc par nombre de logements et une représentation du parc par surface<sup>13</sup>. Dans tous les cas c'est uniquement le type de décideur (et pas la classe de performance énergétique ou l'énergie de chauffage principale) qui détermine cette surface pour une catégorie donnée (maison individuelle, logement collectif, logement social).

**Existant** En France en 2007, la surface moyenne des logements est de 67m<sup>2</sup> pour les logements collectifs et 112m<sup>2</sup> pour les maisons individuelles. Ce sont ces valeurs que l'on garde pendant toute la durée de la simulation

**Neuf** La surface évolue chaque année, selon une procédure expliquée partie 1.2, variant entre 70 et 80m<sup>2</sup> pour les logements collectifs et entre 120 et 140m<sup>2</sup> pour les maisons individuelles<sup>14</sup>.

## 1.2 Croissance du parc de logements/Construction neuve

A l'année  $t$ , le besoin en logements  $H_t$  (en nombre de logements) est déterminé par deux facteurs : la population  $L_t$  et le nombre moyen de personnes par logements  $LPH_t$  :

$$H_t = \frac{L_t}{LPH_t}$$

13. au moins pour l'existant car le neuf ne subit pas de processus de rénovation

14. Dans l'existant il est donc possible de passer de l'un à l'autre par une (hyper)matrice de passage, tandis que dans le neuf ce n'est pas le cas, on doit incrémenter chaque année en parallèle l'augmentation du nombre de logements et l'augmentation de la surface de logements.

Ces deux facteurs sont exogènes. La population est tirée du scenario médian de l'INSEE établi à partir d'hypothèses sur la natalité, la mortalité et l'immigration (population française métropolitaine de 73 millions en 2050). Le nombre moyen de personnes par logements est déterminé de façon exogène pour correspondre aux tendances passées<sup>15</sup>. Ce nombre n'a cessé de diminuer au cours des dernières décennies, passant d'un peu moins de 3 au début des années 80 à un peu plus de 2,5 à la fin des années 2000. Cette diminution est essentiellement imputable à des facteurs socio-démographiques (augmentation du nombre de familles recomposées, célibat géographique, baisse de la natalité etc).

Parallèlement, le parc existant subit une destruction au taux annuel de  $\gamma = 0.5\%$ <sup>16</sup>.

$$S_t^{ancien} = (1 - \gamma)S_{t-1}^{ancien}$$

Le nombre de logements à construire à l'année  $t$  est donc le différentiel entre le besoin en logements  $H_t$  et le stock de logements anciens restants :

$$S_t^{neuf} - S_{t-1}^{neuf} = H_t - S_t^{ancien} \quad (1)$$

La formule (1) donne un nombre de logements à construire.  $S_t^{neuf}$  est le stock de logements neufs *cumulé* (et pas le nombre de logements construits à l'année  $t$ ). Il faut ensuite les répartir dans les différentes classes (performance énergétique, énergie de chauffage, type de décideur). Les types de décideurs des nouveaux logements sont choisis de façon exogène (on garde constant les ratios observés à l'année de base : 37% pour les  $PO_{MI}$ , 22% pour les  $PO_{LC}$ , 6% pour les  $PB_{MI}$ , 15% pour les  $PB_{LC}$  et 20% pour les  $LS$ <sup>17</sup>. Le choix des proportions de classes de performance énergétique et d'énergie de chauffage est expliqué partie 1.4.3 page 23.

La surface des logements neufs est donnée par une formule traduisant le fait qu'une augmentation de richesse induit une augmentation de surface habitable (et encore plus dans les maisons individuelles), cette augmentation étant contrôlée par des valeurs minimales et maximales<sup>18</sup>

15. Par la formule  $LPH_t = (1 + \varepsilon_{LPH} \frac{LPH_{t-1} - LPH_{min}}{LPH_{ref} - LPH_{min}}) LPH_{t-1}$ , avec  $\varepsilon_{LPH} = -0.007$ ,  $LPH_{min} = 2$  et  $LPH_{ref} = 2.42$

16. En réalité il ne s'agit pas d'un taux unique  $\gamma$ , mais d'une multitude de taux  $\gamma_{q,e,d}$  choisis de telle sorte que les mauvaises étiquettes soient détruites en priorité (SARTORI *et al.* 2009), et qu'on retombe au final sur un taux de destruction pondéré par les effectifs de classe de logements de 0,5%, la formule désagrégée est  $S_{t,(q,e,d)}^{ancien} = (1 - \gamma_{q,e,d}) S_{t-1,(q,e,d)}^{ancien}$ .

17. Cela peut sembler un peu grossier de considérer cette répartition par type de décideur immobilier. Cela n'a en fait que très peu d'importance. Le choix du type de décideur fait uniquement varier les taux d'actualisation différenciés qui déterminent à leur tour le coût de l'énergie actualisé. Ces derniers dans le neuf varient peu : 7% pour les maisons individuelles, 10% pour les logements collectifs et 4% pour les logements sociaux, traduisant le fait qu'un promoteur a moins d'incitations à construire un logement bien isolé qu'un particulier car il ne va pas y habiter, le taux faible pour les logements sociaux traduisant la volonté de lutter contre la précarité énergétique). Ce coût de l'énergie actualisé aura une influence sur le choix de performance énergétique et le type d'énergie choisis une fois pour toutes (les logements neufs ne sont pas rénovés). Au final comme les logements neufs ont tous des bonnes performances énergétiques et que le taux d'actualisation varie peu, l'influence est très faible.

18.  $s_t = \frac{s_{max} - s_{t-1}}{s_{max} - s_{ini}} \times \varepsilon_{surface} \times (\frac{1}{p_t^{index}} \frac{R_t^{disp}/L_t}{R_{t-1}^{disp}/L_{t-1}} - 1)$  avec  $s_{max} = 140$  pour les MI (80 pour les LS et les LC),  $s_{ini} = 120$  pour les MI (70 pour les LS et LC),  $\varepsilon_{surface} = 0.2$  pour les MI (0.01 pour les LC et LS),  $L_t$  la population française à l'année  $t$  (exogène),  $R_t^{disp}$  le PIB à l'année  $t$  (exogène ou obtenu par bouclage macro avec IMACLIM-R) et  $p_t^{index}$  l'indice des prix (pris à 1 ici).

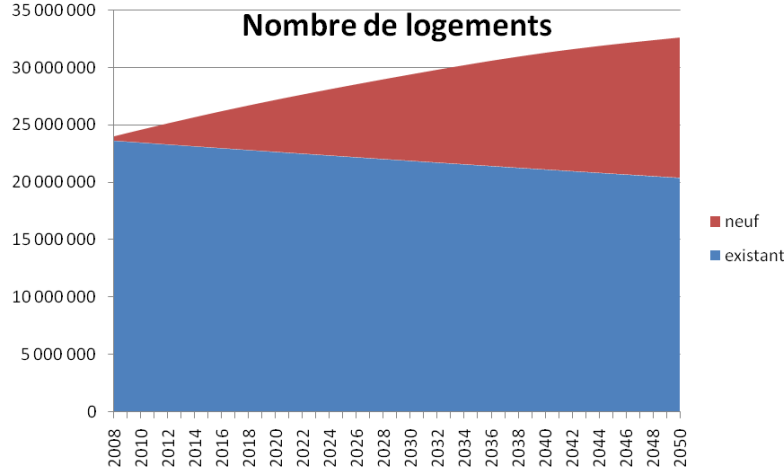


FIGURE 4 – Projection du nombre de logements

### 1.3 Bouclage macroéconomique

Dans l'état actuel, Res-IRF est connecté au modèle IMACCLIM-R (CRASSOUS *et al.* 2006 [18], SASSI *et al.* 2010 [57]) par le biais du prix des énergies  $p_{ener}$  et du revenu des ménages  $R$ . Ces deux valeurs sont calculées dans IMACCLIM-R par un modèle d'équilibre général calculable à une année  $t$ . Ils interviennent alors à différents niveaux dans le modèle Res-IRF (rénovation et choix du type de construction neuve pour  $p_{ener}$ , nombre de constructions neuves pour  $R$ ) qui détermine alors la demande en énergie dans le résidentiel et les investissements dans l'efficacité énergétique. Ces dernières valeurs permettent de calculer un nouvel équilibre dans IMACCLIM-R l'année suivante, donnant de nouvelles valeurs de  $p_{ener}$  et  $R$  et ainsi de suite.

Pour des raisons de facilités de développement et pour isoler son comportement propre, le module Res-IRF a été séparé d'IMACCLIM-R. Ainsi le revenu des ménages et le prix des énergies sont des données exogènes. Le revenu est tiré d'un des scénarios médian d'IMACCLIM-R. Le prix des énergies augmente de 1% par an dans le scénario de référence. Les valeurs de 2007 étant de 11.82, 5.35, 6.72 et 4 centimes d'euros du kWh pour l'électricité, le gaz, le fioul et le bois respectivement (ADEME 2010 [4]).

### 1.4 Processus de rénovation des logements existants

Pour chaque catégorie de logement  $S_{(d,e,q)}^{ancien}$ , seule une fraction  $\tau_{(d,e,q)} S_{(d,e,q)}^{ancien}$  est rénovée chaque année. Les  $\tau_{(d,e,q)}$  sont déterminés de façon endogène selon une procédure décrite partie 1.5 page 23.

Dans cette partie on décrit le processus permettant de déterminer quels types de rénovation sont effectuées sur ce sous-ensemble du parc. Un logement dans la catégorie  $(d, q_i, e_i)$  peut passer dans la catégorie  $(d, q_f, e_f)$  avec  $q_f > q_i$  (ce qui veut dire que l'étiquette énergétique d'arrivée est meilleure) et  $e_f$  quelconque,  $d$  soit le type de décideur ne change pas<sup>19</sup>.

Le changement se fait en deux étapes : dans un premier temps on change de classe

19. Ce qui est normal pour la distinction maison individuelle/logements collectifs, mais l'est moins pour la distinction propriétaire/locataire, c'est une hypothèse que l'on doit prendre par souci de simplicité

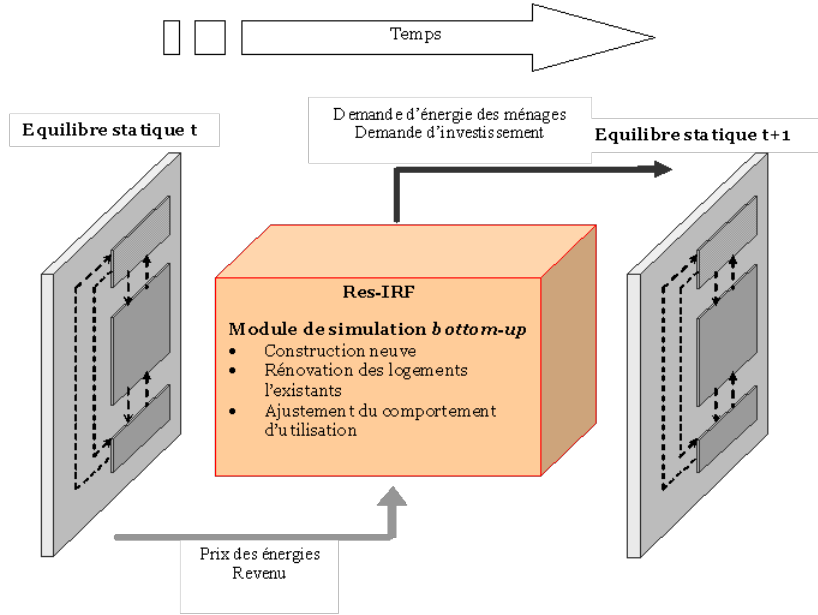


FIGURE 5 – Schéma du bouclage entre Res-IRF et IMAClim-R

énergétique, à énergie donnée. Puis dans un second temps, pour les logements ayant été rénovés, il y a la possibilité de changer de combustible (fuel switch).

Une refonte de ce processus a été entreprise. Simple en apparence, elle nécessite en réalité une nouvelle façon d’appréhender les coûts intangibles et la décroissance des coûts (cf parties suivantes). Dans sa mise en oeuvre, elle nécessite à la fois un travail sur les données empiriques et des modifications importante dans le code Scilab. Pour ces raisons la nouvelle version n’est pas encore opérationnelle, pour plus de détail voir partie 14 en annexe.

#### 1.4.1 Changement d’étiquette

A type de décideur et énergie donnée, parmi les logements rénovés, la proportion passant de la catégorie  $q_i$  à la catégorie  $q_f$ , noté  $PR$  est donnée par la formule :

$$PR_{(d,e)q_i \rightarrow q_f} = \frac{LCC_{(d,e)q_i \rightarrow q_f}^{-\nu}}{\sum_{q_f > q_i} LCC_{(d,e)q_i \rightarrow q_f}^{-\nu}} \quad (2)$$

avec

$$LCC_{(d,e)q_i \rightarrow q_f} = CENER_{(d,q_f,e)} + CINV_{q_i \rightarrow q_f} + IC_{q_i \rightarrow q_f} \quad (3)$$

$LCC$  est le coût total sur le cycle de vie, soit la somme du coût de l’énergie actualisé  $CENER$ , des coûts de rénovation  $CINV$  et des coûts intangibles  $IC$  (leur signification et la description de leur calibrage sont détaillés partie 1.6). Le paramètre  $\nu$  désigne l’hétérogénéité des préférences. S’il était infini, seule la solution la plus efficace sur le plan économique serait choisie. Il peut refléter le fait que la réduction de la facture énergétique n’est pas le seul critère de choix (31% en 2007 selon TNS SOFRES [62]).  $\nu$  vaut 8 dans Res-IRF (partant de G, l’option la moins coûteuse est choisie dans 44% des cas).

	F	E	D	C	B	A
G	76	136	201	271	351	442
F		63	130	204	287	382
E			70	146	232	331
D				79	169	271
C					93	199
B						110

TABLE 1 – Coûts de rénovation

La matrice de coûts de rénovations est donnée dans le tableau 1. L'utilisation d'une telle matrice présente certaines limitations pour différentes raisons :

- *Technologies implicites.* Les travaux de rénovations font intervenir différentes mesures sur l'enveloppe (isolation des combles, isolation des murs, double-vitrage etc) ou sur le système de chauffage (achat d'une chaudière plus efficace). Dans cette matrice ces différentes options technologiques n'apparaissent pas.
- *Hétérogénéité des prix et de l'efficacité des travaux.* Le coût des technologies est mal connu et il existe presque autant de solutions techniques que de logements. Les coûts d'installation sont eux aussi extrêmement variables. Au final le prix des devis peut varier du simple au double. Les travaux peuvent également être faits par les particuliers, ce qui fait diminuer le coût, mais potentiellement la performance énergétique finale si le travail a été mal fait <sup>20</sup>.
- *Hétérogénéité des logements au sein d'une même étiquette.* Le point précédent se poserait même si tous les logements étaient identiques. Le fait qu'ils ne le soient pas complique un peu plus le problème. Par exemple, entre un logement à la limite des étiquette G et F et un logement extrêmement mal isolé, le prix pour arriver à l'étiquette F sera très différent.

L'utilisation d'une telle matrice peut se justifier dans Res-IRF par le fait que l'on travaille sur des classes de plusieurs milliers de logements, et donc que des moyennes de coûts suffisent. Le paramètre  $\nu$  permet alors de modéliser grossièrement ces différentes sources d'hétérogénéité.

Par souci de cohérence, la matrice, dont la construction est détaillée en annexe page 78 respecte deux principes. Premièrement, mis à part la transition G vers F, les coûts de passage à l'étiquette immédiatement supérieure (termes de la diagonale) sont de plus en plus grands, par décroissance des rendements <sup>21</sup>. Gagner 20% d'efficacité énergétique est beaucoup plus simple lorsqu'on part d'un logement mal isolé, car des solutions techniques de plus en plus sophistiquées et donc de plus en plus chères doivent être adoptées au fur et à mesure que l'on gagne en classe énergétique. Deuxièmement, il est toujours moins cher de passer directement d'une étiquette à l'autre que d'effectuer plusieurs sauts d'étiquettes successifs (par exemple  $Coût_{G \rightarrow E} < Coût_{G \rightarrow F} + Coût_{F \rightarrow E}$ ).

Le coût de l'énergie actualisé vaut :

$$CENER_{(d,q_f,e_f)} = Constheo(q_f) \times p_{ener}(e_f) \times DISC(d) \quad (4)$$

La consommation théorique est donnée dans le figure 3. Les ménages ont une *anticipation myope* : ils considèrent le prix de l'énergie  $p_{ener}$  constant, égal à celui de l'année

20. ce qui ne concerne pas seulement les particuliers d'ailleurs. Les logements BBC sont particulièrement concernés : la moindre malfaçon peut coûter cher en termes d'efficacité énergétique

21. Avec les consommations théoriques du modèle, passer de G à F représente une économie d'énergie de 48%, contre 28% pour le passage de F à E

$t$  pour les années à venir. Cette myopie peut se justifier par l'incertitude sur le futur, ou par une règle d'investissement non optimale opérée par les ménages imputable à une rationalité limitée (KEMPTON et MONTGOMERY 1982 [37]). Les travaux anthropologiques confirment cette rationalité limitée (BOVAY *et al.* 1987, pp114-115 [11]) : “Le discours de nos interlocuteurs sur la crise laisse entrevoir qu'ils ne sont guère en position de choisir une attitude de long terme en matière de consommation. (...), ils ne possèdent ni l'envie, ni les informations nécessaires [pour le faire]. (...) qu'il s'agisse de gérer un budget, d'économiser financièrement ou énergétiquement, la tendance générale est dans la gestion “au mois”.”

Le coefficient d'actualisation vaut quant à lui

$$DISC(d) = \frac{1 - (1 + r(d))^{-(lifetime+1)}}{r(d)} \quad (5)$$

Le paramètre *lifetime* est pris à 35 ans ici (durée de vie conventionnelle pour l'enveloppe d'un bâtiment). Les taux d'actualisation différenciés selon le type de décideur  $r(d)$  permettent de modéliser le “dilemme propriétaire-locataire”. Le propriétaire qui loue son logement n'a pas intérêt à supporter des coûts de rénovation s'il ne bénéficie pas lui-même des économies d'énergies réalisées, tandis que le locataire n'a pas intérêt à rénover s'il n'est pas certain de rester au moins aussi longtemps que le temps de retour sur investissement. Il permet également de modéliser la difficulté d'opérer des travaux en copropriété (i.e sur des logements collectifs), ou la volonté politique de lutter contre la précarité énergétique (taux d'actualisation faible pour les logements sociaux). Le dilemme propriétaire-locataire a été observé et bien étudié (LEVINSON et NIEMAN 2004 [41] pour les Etats-Unis, REHDANZ 2007 [54] pour l'Allemagne).

Ces taux d'actualisation valent respectivement 8%, 15%, 45%, 55% et 4% pour les types de décideurs  $PO_{MI}$ ,  $PO_{LC}$ ,  $PB_{MI}$ ,  $PB_{LC}$  et  $LS$ . La moyenne pondérée par les classes de logements de ce taux d'actualisation vaut environ 20%, valeur classique utilisée dans la littérature pour les rénovations énergétiques (TRAIN 1985 [63]).

#### 1.4.2 Fuel switch

Pour les logements ayant été rénovés, la classe de performance énergétique étant fixée, la proportion choisissant l'énergie de chauffage  $e_f$  est donnée par :

$$PRFS_{(d,q_i)e_i \rightarrow e_f} = \frac{LCCS_{(d,q_i)e_i \rightarrow e_f}^{-\nu}}{\sum_{e'_f} LCCS_{(d,q_i)e_i \rightarrow e'_f}^{-\nu}}$$

Avec

$$LCCS_{(d,q_i)e_i \rightarrow e_f} = switch_{e_i \rightarrow e_f} + CENER_{(d,q_i,e_f)}$$

Il n'y a pas pour le fuel switch de coûts intangibles (par manque de données permettant de calibrer le processus).  $CENER_{(d,e,q)}$  est donné par la même formule que 21 page , à l'exception près que le paramètre *lifetime* est pris à 15 ans (durée de vie conventionnelle d'un système de chauffage). La matrice de fuel switch *switch* est donnée dans le tableau 2.

	Combustible final			
	Elec	Gaz	Fioul	Bois
Elec	0	70	100	120
Gaz	55	0	80	100
Fioul	55	50	0	100
Bois	55	50	80	0

TABLE 2 – Matrice de coûts de fuel switch (€/m<sup>2</sup>)

	RT05	BBC	BEPOS
Elec	1150	1400	1700
Gaz	1200	1350	1600
Fioul	1270	1400	1800
Bois	1200	1300	1800

TABLE 3 – Coûts de construction (€/m<sup>2</sup>)

### 1.4.3 Choix des classes de performance énergétique et d'énergie dans la construction neuve

A type de décideur  $d$  donné, les market shares pour la classe de performance énergétique et l'énergie de chauffage est donnée par :

$$PR_{(q,e)} = \frac{LCC_{neuf,(i,e,d)}^{-\nu}}{\sum_{i',e'} LCC_{neuf,(i',e',d)}^{-\nu}}$$

où

$$LCC_{neuf,(q,e,d)} = CENER_{(q,e,d)} + CCONS_{(q,e,d)} + IC_{(q,e,d)}$$

$CENER$  est le coût de l'énergie actualisé (même formule que 4 page 21).  $CCONS$  est donné tableau 3.  $IC$  sont les coûts intangibles dans le neuf (voir partie 1.6 page 25 pour plus d'explications).

## 1.5 Lien qualité/quantité de rénovation

Dans Res-IRF, le nombre de rénovations est déterminé de façon endogène, contrairement à beaucoup d'autres modèles (pour une revue des différents modèles énergie-économie, voir MUNDACA *et al.* 2010 [46]).

On a vu précédemment que pour chaque catégorie de logement  $S_{(d,e,q)}^{ancien}$ , seule une fraction  $\tau_{(d,e,q)} S_{(d,e,q)}^{ancien}$  est rénovée chaque année. On décrit dans cette partie comment cette fraction  $\tau_{(d,e,q)}$  est déterminée.

La valeur actualisée nette  $NPV$  d'une catégorie de logement donnée  $(d, q, e)$  est donnée par la formule :

$$NPV_{(d,q,e)} = CENER_{(d,q,e)} - \sum_{e',q' > q} PR_{d,(q,e) \rightarrow (q',e')} LCC_{d,(q,e) \rightarrow (q',e')}$$

Il s'agit de la différence entre le coût actualisé du statu quo ( $CENER$ ) et le coût actualisé de la rénovation (en fait de la rénovation "moyenne" car il y en a plusieurs



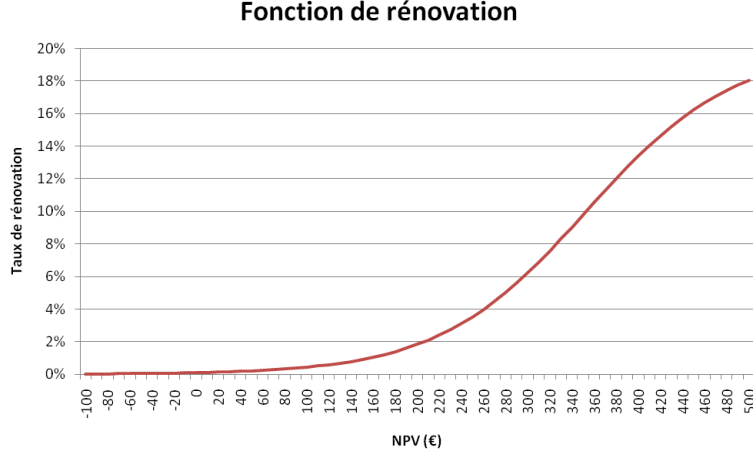


FIGURE 6 – Fonction de rénovation (avec  $r = 0.015$ )

possibles : moyenne des coûts totaux sur le cycle de vie  $LCC$  pondérés par les market shares  $MS$ ).

Pour une classe de logement donnée, plus la rénovation est rentable, plus la fraction rénovée est importante. Le lien entre les deux se fait par la fonction de rénovation  $\mathcal{R}$ .

C'est une fonction logistique donnant le taux de rénovation des logements  $(d, q, e)$ ,  $\tau_{(d,e,q)}$ , en fonction de leur  $NPV$ . Cette fonction a été modifiée par l'auteur pour permettre un calibrage plus rapide et plus fiable (voir GIRAUDET *et al.* 2011 pour l'ancienne version).

$$\tau_{(d,e,q)} = \mathcal{R}_r(NPV_{(d,e,q)}) = \frac{\tau_{max}}{1 + \left(\frac{\tau_{max}}{\tau_{NPV=0}} - 1\right) \exp(-rNPV_{(d,e,q)})}$$

Elle comporte trois paramètres dont deux sont fixés de manière ad hoc et un est déterminé suite à une calibration.  $\tau_{NPV=0}$  est le taux de rénovation lorsque la  $NPV$  vaut 0, il est pris à 0.1%.  $\tau_{max}$  est le taux de rénovation maximum pour une classe de logement donnée. Il se justifie par une contrainte sur l'offre : on ne peut pas rénover entièrement une classe de logement en une seule année. Sa valeur est de 20%.

Le paramètre  $r$  est calibré la première année de telle sorte que la moyenne pondérée par classe de logements des taux de rénovation soit égale au taux de rénovation initial, soit :

$$\mathcal{F}_r(S_{t=t_{ini}}^{ancien}) = \frac{1}{\sum_{(d,q,e)} S_{t=t_{ini}}^{ancien}(d', q', e')} \sum_{(d', q', e')} (S_{t=t_{ini}}^{ancien}(d', q', e') \times \mathcal{R}_r(NPV_{(d', q', e')})) = \tau_{ini}$$

Ce taux, déterminé à partir des données OPEN, vaut 3%, voir partie 12.2 pour plus de détails). La fonction  $\mathcal{F}_r(S_{t=t_{ini}}^{ancien})$  étant une fonction monotone et continue du paramètre  $r$ , ce dernier est déterminé en utilisant un algorithme dichotomique exploitant le théorème des valeurs intermédiaires<sup>22</sup>.

22. Si une fonction  $f$  monotone et continue prend une valeur positive en  $a$  et une valeur négative en  $b$ , alors elle s'annule entre  $a$  et  $b$ .

	F	E	D	C	B	A
G	25%	27%	27%	21%	$\varepsilon\%$	$\varepsilon\%$
F		40%	26%	31%	2%	$\varepsilon\%$
E			66%	28%	6%	$\varepsilon\%$
D				95%	5%	$\varepsilon\%$
C					91%	9%
B						100%

TABLE 4 – Transitions d’étiquettes “réelles”, déterminées à partir de 500 opérations de rénovation prises dans le logement social (adapté de PUCA 2008 [52])

	F	E	D	C	B	A
G	8	31	37	35	139	162
F		15	35	10	93	133
E			18	24	33	121
D				5	35	83
C					43	24
B						0

TABLE 5 – Coûts intangibles dans les rénovations (€/m<sup>2</sup>)

## 1.6 Calibrage des coûts intangibles

Si l’on ne prenait en compte que le coût de l’énergie actualisé  $CENER$  et les coûts de rénovation  $CINV$ , les transitions de classes énergétiques calculées de façon endogène ne reflèteraient pas les transitions réellement observées (voir tableau<sup>23</sup> 4). Les coûts intangibles sont rajoutés pour que ce soit le cas.

Ils sont calibrés la première année en résolvant un système non linéaire que l’on détaille en annexe partie 13 page 81.

Leur interprétation économique est délicate. De par leur nature même de coûts *non tangibles*, on peut leur donner une valeur de tout ce qui ne rentre pas dans le calcul économique classique : coûts d’information (URGE-VORSATZ *et al.* 2009 [55]), coûts de transaction, coûts cachés (gêne occasionnée pendant les travaux par exemple), prime de risque contre la malfaçon (FARSI 2010 [23]), valeur d’option (en attendant le développement de nouvelles technologies), préférence pour les autres attributs de la technologie (BEUGIN et JACCARD 2011 [10]).

Dans ce modèle, on leur prête une véritable valeur économique liée aux coûts d’information (voir partie 1.7). Ils jouent donc le double rôle d’instrument de calibration (faire en sorte que les transitions endogènes correspondent aux transitions observées) et d’instrument de modélisation économique (du social learning).

### 1.6.1 Construction neuve

Le principe est le même dans la construction neuve. Ce ne sont pas des transitions qui sont à reproduire, mais les parts de marché de la construction neuve en fonction de la classe énergétique et du type de combustible (voir tableau 6).

23.  $\varepsilon$  dans le tableau est pris à 0.0001

	RT05	BBC	BEPOS	
Elec	51%	6%	1%	64%
Gaz	21%	2%	$\varepsilon\%$	24%
Fioul	3%	$\varepsilon\%$	$\varepsilon\%$	3%
Bois	8%	1%	$\varepsilon\%$	9%
	89%	10%	1%	

TABLE 6 – Parts de marché de la construction neuve (adapté de OPEN 2008 [49])

	RT05	BBC	BEPOS
Elec	100	291	585
Gaz	211	560	983
Fioul	562	1079	1550
Bois	419	870	1320

TABLE 7 – Coûts intangibles dans la construction neuve (pour un taux d’actualisation de 8%) (en €/m<sup>2</sup>)

## 1.7 Evolution des coûts intangibles et des coûts de rénovation

Les coûts de rénovation et de construction décroissent par un processus de *learning-by-doing* assez classique (GILLINGHAM *et al.* 2008 [24]) : plus le nombre de travaux déjà réalisés est important, et plus le prix de ces derniers est faible. Ainsi la rénovation énergétique engendrerait des externalités positives : si je suis un particulier, les travaux que je fais aujourd’hui aurait un effet bénéfique pour mes voisins car s’ils en feraient demain ils seraient moins cher.

On s’inspire également de ce processus pour faire décroître les coûts intangibles (on nomme cet effet par analogie *learning-by-using*). Si on considère que les coûts intangibles représentent un manque d’information, les travaux effectués peuvent engendrer des “externalités positives d’information” par effet de voisinage ou *neighbor effect* : je fais des travaux d’efficacité énergétique car mes proches m’ont parlé de leurs travaux et de leur satisfaction d’avoir diminué leur facture énergétique (voir MAU *et al.* 2008 [44] pour un processus similaire dans le modèle CIMS). Dans l’enquête TNS Sofres de 2009, 10% des ménages affirment que le conseil des parents et amis est la source d’information la plus utile. Cet effet aussi appelé *social learning* en économie, est compatible avec l’hypothèse de l’homo economicus rationnel (un individu adopte une technologie lorsqu’il a eu suffisamment de *preuves de son efficacité* dans son entourage), au contraire des concepts de *contagion* utilisé en marketing (les innovations se propagent par “contact” comme des virus) et de *social influence* en sociologie (technologie adoptée par conformisme social) (YOUNG 2009 [66]).

A titre indicatif, mentionnons que les politiques d’information<sup>24</sup> peuvent avoir un impact considérable et déterminer le contexte socio-technique des décennies futures. Après-guerre, EDF-GDF embauche pour rentabiliser ses investissements des “monitrices d’enseignement ménager” parcourant les campagnes et encourageant les femmes à acheter les “bons produits” (SUBRÉMON 2010 [61]). Cette politique volontariste a entraîné une surreprésentation du chauffage électrique, avec les problèmes de “pointes hivernales” que cela pose à l’heure actuelle.

D’autre part, des mécanismes économiques lient la demande de travaux de rénovations

24. difficiles à modéliser de façon satisfaisante, elles ne sont pas traitées dans Res-IRF.

et les coûts des devis proposés par les artisans. L'ADEME aurait observé une augmentation du prix des devis des artisans suite aux incitations publiques à effectuer des travaux (SUBREMON 2010 [61]). Ces aspects ne sont pas modélisés dans Res-IRF car le marché de la rénovation n'y est pas représenté. Les coûts de rénovation *ne peuvent que décroître* par learning-by-doing.

Cette partie décrit les procédés de learning-by-doing et learning-by-using.

Chaque année on sauvegarde l'augmentation du stock de capital installé dans le neuf et dans l'existant :

- La surface rénovée selon l'étiquette d'arrivée :  $\Delta K_{existent}$  (vecteur allant de l'étiquette F à l'étiquette A).
- La surface construite selon l'étiquette d'arrivée,  $\Delta K_{neuf}$  (vecteur de taille 3 : RT05, BBC, BEPOS).

Le stock de capital installé l'année suivante est alors  $K + \Delta K$ . Le stock de capital initial revêt alors une certaine importance<sup>25</sup>.

Le stock de capital installé permet alors de calculer deux facteurs (les formules sont les mêmes pour le neuf et l'existant) :

$$\begin{cases} LBD^t = (1 - l) \frac{\log(K^t(q_f)/K^0(q_f))}{\log(2)} \\ LBU^t = (1 - u) \frac{\log(K^t(q_f)/K^0(q_f))}{\log(2)} \end{cases}$$

$l$  est le taux d'apprentissage, valant 10% pour les rénovations et 15% pour la construction neuve.  $u$ , le taux d'information, vaut 25% pour les rénovations et les nouvelles constructions. Valant 1 au départ,  $LBD$  (respectivement  $LBU$ ) diminue de  $l\%$  (respectivement  $u\%$ ) à chaque fois que le stock de capital installé double par rapport au stock de capital initial<sup>26</sup>.

Une étude empirique (WEISS *et al.* 2010 [65]) donne des taux d'apprentissage à 18 plus ou moins 9% pour les technologies utilisées par les consommateurs. Mais le coût

25. Le stock de capital initial revêt alors une certaine importance. En effet, il détermine la vitesse de décroissance des coûts (on décroît du taux d'apprentissage en pourcents à chaque doublement du stock de capital par rapport au stock initial). Si on prend une valeur trop petite, le stock de capital installé double très vite et les coûts décroissent trop vite.

Sa détermination ne peut relever que de l'appréciation du modélisateur. Voici les valeurs retenues :

Pour l'existant  $K_{existent}(0) = S_{F:A} \times \tau_{ini} \times nb_{années}$

où  $S_{F:A}$  est la surface des logements dans le parc initialement pour les étiquettes allant de F à A et  $nb_{années}$  un paramètre pris à 10 ans.

Pour le neuf,  $K_{neuf}(0)$  vaut la surface totale du parc pour RT05, le tiers de la surface totale du parc des logements supérieurs à C pour BBC et le sixième de la surface totale des logements supérieurs à B pour BEPOS. Ces valeurs résultent d'un choix ad hoc du modélisateur pour contrôler la vitesse de décroissance des coûts.

26. En effet, il détermine la vitesse de décroissance des coûts (on décroît du taux d'apprentissage en pourcents à chaque doublement du stock de capital par rapport au stock initial). Si on prend une valeur trop petite, le stock de capital installé double très vite et les coûts décroissent trop vite.

Sa détermination ne peut relever que de l'appréciation du modélisateur. Voici les valeurs retenues :

Pour l'existant  $K_{existent}(0) = S_{F:A} \times \tau_{ini} \times nb_{années}$

où  $S_{F:A}$  est la surface des logements dans le parc initialement pour les étiquettes allant de F à A et  $nb_{années}$  un paramètre pris à 10 ans.

Pour le neuf,  $K_{neuf}(0)$  vaut la surface totale du parc pour RT05, le tiers de la surface totale du parc des logements supérieurs à C pour BBC et le sixième de la surface totale des logements supérieurs à B pour BEPOS. Ces valeurs résultent d'un choix ad hoc du modélisateur pour contrôler la vitesse de décroissance des coûts.

d'installation<sup>27</sup> n'est pas compris dans ces études, qui se concentrent sur le prix du bien technologique seulement. De plus, les études économétriques surestiment ces taux d'apprentissage (NORDHAUS 2009 [48]). C'est pourquoi les taux utilisés dans Res-IRF sont légèrement inférieurs aux estimations données plus hauts.

Les coûts de rénovations valent finalement :

$$CINV_{q_i \rightarrow q_f}^t = CINV_{q_i \rightarrow q_f}^0 \times LBD_{existent}^t$$

Pour les coûts de construction, le processus est identique excepté l'existence de bornes inférieures<sup>28</sup> :

$$CCONS_{(q,e)}^t = CCONS_{(q,e)}^{lim} + (CCONS_{(q,e)}^t - CCONS_{(q,e)}^{lim})LBD_{neuf}^t$$

Enfin pour les coûts intangibles, seule une fraction du coût de départ décroît :

$$IC^t = IC^0((1 - \beta) + \beta \times LBU^t) \quad (6)$$

La part variable des coûts intangibles  $\beta$  vaut 80% pour l'existant et 95% pour le neuf. La part non variable quant à elle peut être interprétée par exemple comme la gêne occasionnée par les travaux, qui ne diminue pas même avec des effets d'information.

## 1.8 Passage consommation théorique/consommation réelle : effet rebond

Pour un logement donné, on peut décomposer la consommation d'énergie finale en trois facteurs : la surface du logement  $S$ , l'efficacité du logement et le *facteur de service*, caractérisant le comportement économe ou dépensier des occupants par rapport à la facture d'énergie :

$$E_{fin} \equiv S \times \frac{E_{conv}}{S} \times \frac{E_{fin}}{E_{conv}}$$

$\frac{E_{conv}}{S}$  (en kWh/m<sup>2</sup>/an) est ici la consommation d'énergie issue directement d'un diagnostic de performance énergétique, tandis que  $E_{fin}$  est l'énergie réellement consommée. Dans Res-IRF, le passage de l'un à l'autre (soit le rapport  $\frac{E_{fin}}{E_{conv}}$  nommé *facteur de service*) est modélisé par une fonction de facteur de service prenant en argument la consommation théorique  $\frac{E_{conv}}{S} = \rho$  et le prix de l'énergie  $p$ . Cette fonction est décroissante par rapport à la dépense énergétique théorique  $p \times \rho$ .

En effet, après investissement dans l'efficacité énergétique, la consommation d'énergie observée est très souvent supérieure à celle attendue par des hypothèses conventionnelles (thermostat intérieur à 19°C par exemple), c'est l'*effet rebond*. Parfois dû à des malfaçons, cette augmentation du facteur de service est le plus souvent dû à un changement de comportement de l'utilisateur. Ce changement de comportement peut être expliqué par une rationalité de l'agent qui réalloue des ressources entre deux attributs du service énergétique : le confort qu'il procure et la dépense qu'il occasionne (SORRELL et DIMITROPOULOS 2008 [59]).

27. qui représente une part importante du coût total et qui n'est pas affecté par le learning-by-doing, mais plutôt par des mécanismes d'offre/demande

28. il y a plus de coûts "fixes" dans la construction neuve que dans la rénovation

Cet effet rebond fait parfois l’objet de différents “jugements de valeur” selon les disciplines. Pour les énergéticiens, c’est un gâchis d’économies d’énergies imputable à l’utilisateur qui ne “joue pas le jeu”. Pour les économistes, il s’agit plutôt d’une substitution confort thermique/dépense résultant d’une maximisation de bien-être.

La prise en compte de l’effet rebond est un réel atout de Res-IRF par rapport à d’autres modèles mais sa modélisation par l’intermédiaire unique de cette courbe d’utilisation repose sur des hypothèses qu’il est important de clarifier.

- Tous les utilisateurs ont le même comportement. Dans la réalité, le comportement des ménages face à la consommation d’énergie est très varié et a fait l’objet d’études sociologiques et anthropologiques. On peut citer ici quelques éléments. Les populations les plus riches sont généralement les plus sensibles aux questions écologiques et énergétiques, mais leur pouvoir d’achat important fait que leurs aspirations ne sont pas toujours reflétées dans leurs habitudes de consommations (ROY 2007 [56]). Le rapport à l’énergie peut également être différent selon les générations (MOUSSAOUI 2009 [45]) : adolescents plus gaspilleurs par volonté d’émancipation, jeunes adultes plus raisonnables par limitation du budget, etc. Enfin, la consommation d’énergie renvoie également à l’image que l’on veut donner de soi : généreux ou radin, concerné par les problématiques écologiques ou pollueur (DESJEUX *et al.* 1996 [22]). L’utilisation d’un ménage “moyen” ou représentatif peut se justifier ici car on raisonne à l’échelle macro.
- La courbe n’évolue pas sur toute la durée de la simulation. Or les comportements des ménages vis-à-vis de l’énergie ne sont pas constants au cours du temps mais évoluent. Dans un article, Koomey qualifie même de “big mistake” le fait de se baser sur des paramètres historiques et de considérer les paramètres comportementaux comme immuables pour réaliser des prévisions (KOOMEY 2002). Il est toutefois difficile de faire autrement dans le cadre d’une modélisation.
- Le passage de la consommation conventionnelle à la consommation réelle par une fonction suggère une totale réversibilité. Or des études sociologiques montrent que ce qui est considéré comme luxueux un jour peut devenir au contraire banal, quotidien et donc parfaitement nécessaire quelques années plus tard (HITCHINGS 2008 [29], sur la perception de la climatisation parmi les jeunes de Singapour). Ces phénomènes de lock-in “psychologiques” ne sont pas pris en compte.

Les deux courbes ont été construites sur des données réelles EDF obtenues grâce à B. ALLIBE. Sur la figure 7, les points sont les déciles (ordonnés par dépense énergétique théorique) d’un échantillon de 900 ménages. Les paramètres de la courbe “nouvelle logistique” sont obtenus à la main, tandis que ceux de la courbe “élasticité constante” le sont par une régression linéaire.

Deux versions sont utilisées. La première (nouvelle logistique) est de la forme

$$Fact_{service} = conso_{min} + \frac{conso_{max} - conso_{min}}{1 + a \exp(bpp - c)}$$

avec  $p$  le prix de l’énergie,  $\rho$  la consommation conventionnelle (en kWh/m<sup>2</sup>/an),  $a = 1$ ,  $b = 0,2$ ,  $c = 1,8$ ,  $conso_{min} = 0.45$ ,  $conso_{max} = 1.45$ .

La deuxième (élasticité constante ou isoélastique) est :

$$Fact_{service} = K(pp)^e$$

avec  $K = 2,72$  et  $e = -0,505$ .

Pour une catégorie de logement donnée, la consommation d’énergie finale vaut :

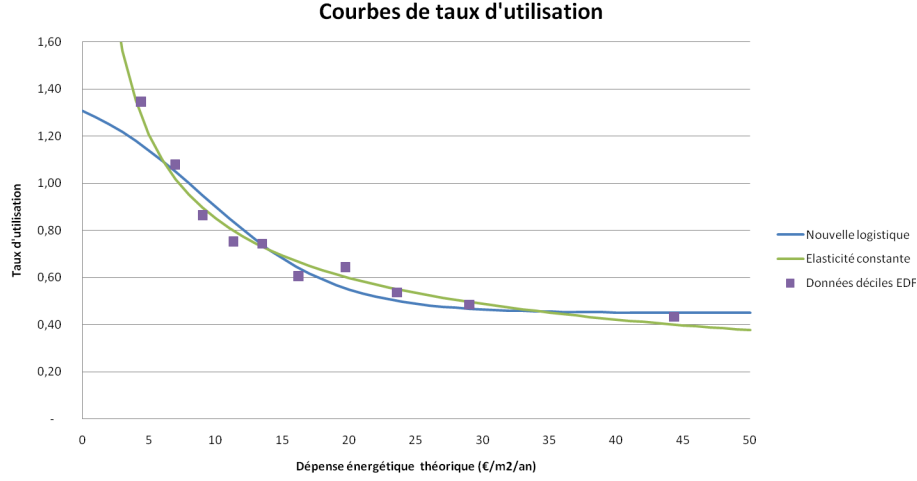


FIGURE 7 – Courbes de facteur de service

$$E_{fin} = \frac{E_{fin}}{E_{conv}} \times S \times \frac{E_{conv}}{S} = Fact_{service} \times S \times \rho$$

En sommant sur toutes les catégories de logements, on a finalement :

$$E_{fin,tot} = \sum_{(q',e',d')} Fact_{service,(q',e')} \times S_{d'} \times \rho_{(q',e')}$$

## 2 Paramétrage des différentes politiques

Res-IRF permet de simuler l'effet de politiques déjà existantes du Grenelle de l'environnement sur la consommation d'énergie pour le chauffage résidentiel (CIDD, Eco-PTZ, RT 2012-2020) mais aussi des mesures supplémentaires (obligation de rénovation, taxe carbone).

Dans cette partie nous discutons de la façon dont ces politiques sont paramétrées. La simplicité du modèle ne permet souvent pas de prendre en compte toutes les règles d'une politique donnée.

Pour leur effets sur la consommation d'énergie, voir partie 10 page 58.

### 2.1 Crédit d'impôt développement durable (CIDD)

Certains achats de biens efficaces en énergie, comme les travaux d'isolation, les doubles vitrages, les chaudières à condensation, sont éligibles au CIDD. Les règles d'attribution sont assez techniques et ont évolué au cours du temps.

Dans Res-IRF, le CIDD est représenté de manière simplifiée sous la forme d'une subvention, comme une remise uniforme de 30% du coût d'investissement pour toute transition vers une classe énergétique supérieure, plafonnée à 8000€ par logement.

Les enquêtes ont montré que cette mesure a été un réel déclencheur de travaux d'efficacité énergétique (54% des ménages ayant réalisé des travaux ont été influencés par

celui-ci, TNS SOFRES 2010 p41 [62], voir aussi M.L NAULEAU 2011 [47] pour son évaluation). Son coût budgétaire important (revers de son succès) ainsi que la crainte d'un effet d'aubaine<sup>29</sup> massif ont cependant poussé l'Etat à restreindre les conditions d'éligibilité.

## **2.2 Eco-prêt à taux zéro (EcoPTZ)**

En l'absence de classes de revenus représentant les contraintes de liquidités, l'Eco-PTZ est représenté par une subvention correspondant au montant total des intérêts d'un prêt conventionnel (du montant des coûts des travaux de rénovations) de 10 ans à 4%.

## **2.3 Règlementation thermique pour les bâtiments neufs (RT2012 RT2020)**

Avoir des critères exigeants d'efficacité énergétique dans la construction neuve a été l'une des mesures les plus consensuelles du Grenelle de l'Environnement.

Dès 2013, les nouveaux bâtiments devront se conformer au label BBC (moins de 50 KWh/m<sup>2</sup>/an), et il est question à partir de 2020 d'imposer le label BEPOS.

Dans Res-IRF, on traduit ces mesures par la restriction successive des catégories d'efficacité énergétique des bâtiments dans la construction neuve<sup>30</sup>.

## **2.4 Obligation de rénovation (OR)**

L'obligation de rénovation impose la réalisation de bouquets de travaux visant à atteindre la classe B ou C à chaque transaction immobilière. Cette obligation commencerait à la classe G en 2012 puis s'étendrait successivement aux autres classes énergétiques.

Pour représenter cette politique, on force le taux de rénovation endogène pour les logements situés sous le seuil afin de le faire correspondre aux cycles de changement d'occupant : 3,5% des logements occupés par leur propriétaire, 18% des logements loués dans le parc non social et 10% dans le parc social<sup>31</sup> (CGDD 2009 [15]). Les classes énergétiques d'arrivée sont limitées aux catégories supérieures ou égales à C.

## **2.5 Taxe carbone (ou CCE Contribution Climat Energie)**

La valeur du carbone utilisée dans Res-IRF suit celle du rapport Quinet : 32€ par tonne de CO<sub>2</sub> en 2010, augmentant de 5.8% par an jusqu'en 2030 puis de 4% par an ensuite, atteignant 217€/tCO<sub>2</sub> en 2050. La taxe carbone est parfaitement anticipée par les ménages au moment où elle est mise en place. Le contenu carbone des différentes énergies retenu pour l'application de la taxe est de 180g/kWh pour l'électricité, 201g/kWh pour le gaz, 271g/kWh pour le fioul et 0g/kWh pour le bois-énergie (ADEME 2007).



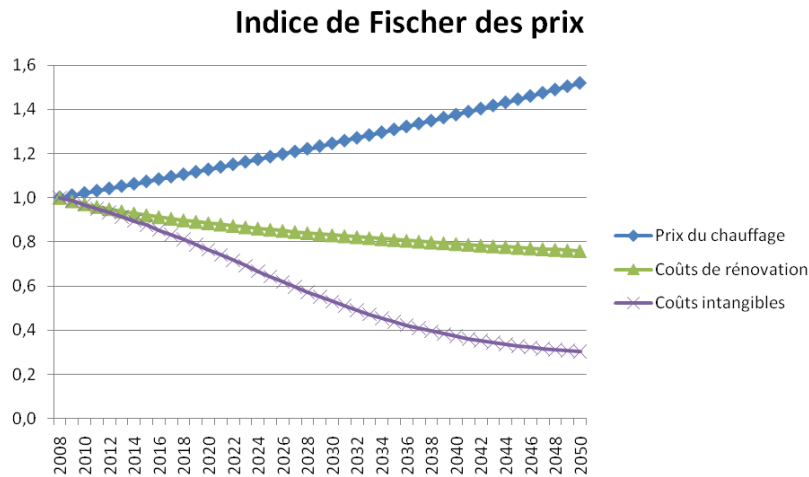


FIGURE 8 – Evolution des coûts dans le scénario BAU

### 3 Quelques résultats du modèle pour le scénario “au fil de l’eau”

Comme on peut le voir figure 8, les trois composantes du coût total sur le cycle de vie (prix de l’énergie, coûts de rénovation, coûts intangibles, agrégés grâce à l’indice de Fischer) n’évoluent pas de la même façon. Le prix de l’énergie augmente au taux annuel de 1% (c’est un input, il pourrait évoluer différemment). En revanche, les coûts de rénovation et les coûts intangibles ne peuvent que décroître par le processus de learning-by-doing et learning-by-using. Les stocks de capital installés étant les mêmes pour les deux processus, ce qui explique la décroissance plus rapide des coûts intangibles est le taux d’information valant 25%, contre 10% pour le taux d’apprentissage.

Pour une classe énergétique donnée, l’augmentation du prix de l’énergie (cela coûte plus cher d’avoir un logement peu performant) et la diminution des coûts de rénovation et des coûts intangibles (cela coûte moins cher de rénover) augmentent la rentabilité des travaux de rénovation, et donc leur occurrence d’après notre dynamique. Mais un autre phénomène poussant à moins de rénovations contrebalance cet effet : *l’épuisement des gisements*. Globalement, plus un logement est bien isolé, et moins les travaux de rénovations ultérieurs sont rentables. A coûts constants, le nombre de rénovations diminue donc avec l’augmentation de la performance du parc de logements. Les “meilleurs” travaux sont fait en premier et le gisement d’économies d’énergie s’épuise.

La résultante des deux phénomènes est donc difficile à prévoir et dépend des paramètres de notre modèle. Ici c’est plutôt le deuxième effet qui l’emporte : il y a de moins en moins de rénovations, mais c’est aussi parce que le taux de rénovation initial est assez élevé voir partie II page 35.

Comme on peut le voir sur l’histogramme de droite de la figure 9, la distribution des

29. même en l’absence de CIDD, beaucoup de ménages auraient fait des travaux

30. Ce sont les RT telles qu’elles étaient à l’origine qui sont simulées, à savoir BBC en 2012 et BEPOS en 2020

31. Par simplification on considère que ces taux de renouvellement ne changent pas suite à l’introduction de cette mesure. On surestime donc certainement l’impact de cette mesure car une telle obligation donnerait des incitations aux propriétaires à garder leurs locataires plus longtemps.

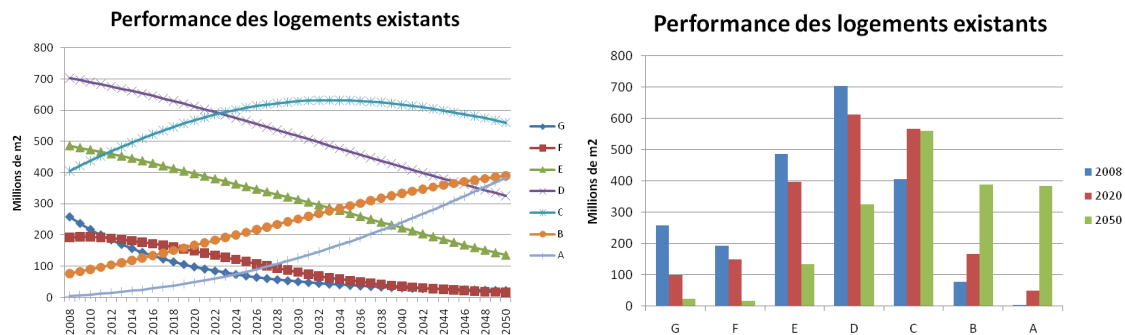


FIGURE 9 – Evolution du Parc existant en scenario BAU

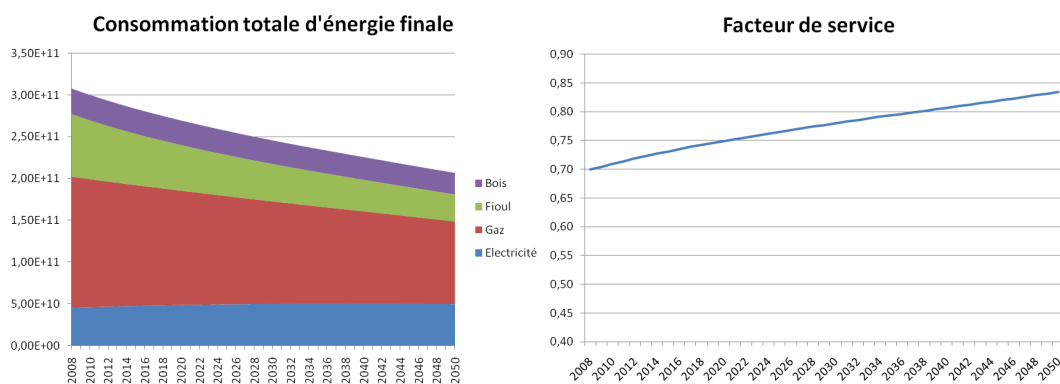


FIGURE 10 – Evolution de la consommation d'énergie et du facteur de service en scenario BAU

logements en fonction de la performance énergétique se déplace vers davantage d'efficacité énergétique. Sur la figure de gauche, on voit que la surface totale des logements appartenant à des "mauvaises" étiquettes (G,F,E,D) diminue tandis que celle des "bonnes" (A et B) augmente. Pour l'intermédiaire, à savoir C, on a une courbe en U inversé : l'effectif de cette catégorie augmente dans un premier temps avec l'afflux d'anciens logements rénovés, puis diminue au fur et à mesure que ces logements se rénovent pour passer dans les catégories A et B.

Deux effets s'opposent dans l'évolution du facteur de service (le rapport entre l'énergie finale réellement consommée et l'énergie finale conventionnnelle issue d'un diagnostic de performance énergétique). L'augmentation des prix de l'énergie conduit à plus de sobriété donc à une diminution de ce facteur de service. Mais l'augmentation de la performance énergétique globale consécutive aux travaux de rénovations diminue la facture énergétique théorique et entraîne donc par effet rebond une augmentation du facteur de service. Comme on peut le voir figure 10, le deuxième effet l'emporte sur le premier.

Malgré cet effet rebond aux alentours de 20% (valeur que l'on trouve dans Res-IRF et qui correspond à la valeur moyenne issue d'une méta-analyse (SORRELL *et al.* 2009 [60])), la consommation d'énergie dans l'existant diminue de façon conséquente. Les parts du gaz et du fioul diminuent dans la consommation d'énergie finale (48% et 16% en 2050 contre 53% et 20% en 2007) au profit de l'électricité et du bois (24% et 12% en 2050 contre 17%

11% en 2007).

## Deuxième partie

# Analyse de sensibilité

Différentes taxonomies des incertitudes ont été réalisées par les chercheurs en Sciences Sociales, Oreskes (ORESKEs 1998 [50]) les classe en quatre catégories.

- *Les incertitudes théoriques.* Certains mécanismes utilisés dans le modèle qui ne sont pas parfaitement compris de façon générale, faisant l’objet de controverses scientifiques. Dans Res-IRF : mécanismes poussant les ménages à entamer les travaux de rénovation, comportement de consommation des utilisateurs (effet rebond), méthodes d’estimation des taux d’apprentissage (NORDHAUS 2009 [48]).
- *Les incertitudes empiriques.* Données du problèmes difficiles (voire impossibles) à mesurer. Dans Res-IRF : coûts de rénovation à haut niveau d’aggrégation, nombre de logements ayant le bois comme énergie de chauffage principale, transitions d’étiquettes réelles.
- *Les incertitudes paramétriques.* Elles apparaissent lorsqu’il est nécessaire de réduire la complexité d’un système pour pouvoir plus facilement le modéliser. Dans Res-IRF : segmentation du parc par classes de logements, taux d’actualisation uniques par types de décideurs, choix de la courbe logistique donnant le pourcentage de rénovation, choix de la courbe comportementale de facteur de service.
- *Les incertitudes temporelles.* On est souvent forcés de faire l’hypothèse que les systèmes sont stables au cours du temps, qui n’est au mieux qu’une approximation. Ces incertitudes prennent une place prépondérante lorsqu’on modélise non pas des systèmes physiques mais des systèmes influencés par les dynamiques économiques, sociétales et institutionnelles (DE MARCHI 1995 [19]) ou lorsque le comportement humain intervient (KOOMEY 2000 [38]). Des percées technologiques peuvent également avoir des conséquences inattendues. Dans Res-IRF : courbe de facteur de service ne changeant pas au cours du temps, taux d’actualisation n’évoluant pas.

De tous ces types d’incertitudes, seules les incertitudes empiriques peuvent être traitées de façon satisfaisante par des méthodes de Monte Carlo (en supposant que les marges d’incertitudes empiriques soient bien connues et que les capacités de calcul soient suffisamment importantes). Pour les autres, elles sont souvent explicitées dans la description des modèles mais difficiles voire impossibles à évaluer. Une façon de les traiter serait de procéder par scénarios (VAN ASSELT et ROTMANS 2002 [7]), ou par comparaison de modèles entre eux (ENERGY MODELLING FORUM).

Dans ce chapitre, on développe une méthode de Monte Carlo pour évaluer les incertitudes sur les sorties du modèle (ce sont les incertitudes empiriques qui sont traitées) puis faisons une analyse de variance sur les paramètres (on traite alors de façon partielle des incertitudes paramétriques).

## 4 Méthode

Certains paramètres ne sont plus fixés mais deviennent des variables aléatoires. A chaque simulation, on effectue un tirage aléatoire des paramètres selon leur loi de distribution avant de faire tourner le modèle<sup>32</sup>. On sauvegarde certaines sorties : consommation d’énergie réelle et conventionnelle, taux de rénovation, indice de Fisher des coûts intangibles et des coûts de rénovation, stock de logements par classes énergétiques ou par

---

32. sans aucune politique

énergie de chauffage principale ; puis on recommence. Les sorties du modèle sont alors des distributions statistiques.

Certaines combinaisons de paramètres font échouer la calibration des coûts intangibles. En cas d'erreur, l'algorithme est conçu pour passer à la simulation suivante et ainsi ne pas s'arrêter. A la fin seules les simulations réussies sont gardées. Les premiers essais d'analyse de sensibilité ont permis de définir des plages de valeurs de paramètres qui minimisent ces erreurs (notamment pour le paramètre  $\nu$ ). Le taux d'échec est situé entre 1 et 2%, ce qui limite les biais statistiques.

Au total environ 18 000 simulations ont été réalisées.

## 4.1 Variables

Dix degrés de liberté sont choisis pour cette analyse de sensibilité.

- *Le taux de croissance du prix des énergies* (qui est le même pour toutes les énergies et reste constant de 20078 à 2050). Valeur référence : 1%.

Ce paramètre détermine le prix de l'énergie, qui intervient plusieurs fois dans le processus de rénovation par l'intermédiaire de *CENER* (voir partie 1.4 équation (3)), ainsi que dans la courbe de facteur de service (voir partie 1.8). Plus le prix de l'énergie est élevé, plus on a un comportement "sobre" et plus il est profitable de faire des rénovations, donc moins on consomme d'énergie.

- *Les coûts de rénovation dans l'existant*. Valeur référence : la matrice

$$C_{INV-Existant} = \begin{pmatrix} 76 & 136 & 201 & 271 & 351 & 442 \\ 0 & 63 & 130 & 204 & 287 & 382 \\ 0 & 0 & 70 & 146 & 232 & 331 \\ 0 & 0 & 0 & 79 & 169 & 271 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 93 & 199 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 110 \end{pmatrix}$$

Cette matrice (rappel : le premier terme en haut à gauche donne le coût en €/m<sup>2</sup> pour passer de la catégorie G à la catégorie F), intervient dans le processus de rénovation (voir partie 1.4 équation (3)). Plus les coûts de rénovation sont faibles, et plus il est intéressant de rénover, donc moins on consomme d'énergie.

- *Le taux de rénovation annuel initial*. Valeur référence 3%.

Ce paramètre permet de calibrer le paramètre  $r$  de la fonction  $\mathcal{R}$  de rénovation, qui détermine les fractions de chaque catégorie de logements qui vont être rénovés (voir partie 1.5) chaque année. Toutes choses égales par ailleurs (prix de l'énergie, coûts de rénovations, coûts intangibles), un taux de rénovation initial grand va entraîner l'utilisation d'une courbe de rénovation "optimiste", c'est à dire donnant une plus grande fraction de chaque catégorie rénovée pour la même  $NPV$ , donc plus il y aura de rénovations, et plus la consommation sera faible.

- *Le taux d'apprentissage dans l'existant* (et de façon corrélée le taux d'apprentissage dans le neuf, voir plus loin). Valeur référence : 10%.
- *Le taux d'information*. Valeur référence 25% (neuf et existant).

Ces deux paramètres déterminent la vitesse de décroissance des coûts de rénovations et des coûts intangibles. Pour une même augmentation de capital installé donnée (ie pour le même nombre de rénovation), plus ces paramètres sont grands et plus la décroissance des coûts sera grande (voir partie 1.7), et donc plus il y aura de rénovation, et plus la consommation sera faible.

- *La part variable dans les coûts intangibles*. Valeur référence 80%.

Plus ce paramètre est grand, et plus la décroissance des coûts intangibles sera grande (toute chose égales par ailleurs), voir équation (6) partie 1.7.

- *Le taux d’actualisation pour les  $PO_{MI}$  dans l’existant* (et de façon corrélée le taux d’actualisation pour les  $PO_{LC}$ ). Valeur référence 8%.
- *Le taux d’actualisation pour les  $PB_{LC}$  dans l’existant* (et de façon corrélée le taux d’actualisation pour les  $PB_{MI}$ ). Valeur référence 55%.

Le taux d’actualisation intervient dans le calcul de  $CENER$  (voir équations (??) et (5) partie 1.4). Il modélise le dilemme propriétaire-locataire et la difficulté de faire des travaux en copropriété. Plus le taux d’actualisation est grand, plus le coût de l’énergie actualisé est faible, et moins il est intéressant de faire des travaux.

- *Le paramètre d’hétérogénéité des préférences  $\nu$* . Valeur référence 8.

Ce paramètre intervient dans le calcul des transitions d’étiquettes dans la procédure de rénovation (équation (2) partie 1.4). Plus  $\nu$  est grand, et plus la solution minimisant le coût total sur le cycle de vie est favorisée (ce n’est généralement pas la plus efficace au point de vue énergétique, il n’est donc pas possible de prédire l’évolution dans un sens ou dans l’autre de la consommation d’énergie). L’expérience a montré que des valeurs extrêmes de ce paramètre perturbaient la calibration des coûts intangibles.

- *La courbe de facteur de service*.

Cette courbe modélise l’effet rebond en reliant énergie finale conventionnelle et énergie finale réelle (voir partie 1.8). Elle n’a donc aucun impact sur l’efficacité (le nombre et la qualité des rénovations) mais est déterminante sur la sobriété.

En termes plus techniques, cette analyse de sensibilité porte donc sur un *input*, le taux de croissance du prix des énergies, deux *initial state*, les coûts de rénovation dans l’existant et le taux de rénovation annuel initial et sept *paramètres*.

## 4.2 Variation des paramètres

Pour déterminer la distribution de probabilité des paramètres, des méthodes économétriques (méthodes de préférences déclarées ou révélées pour les paramètres comportementaux) ou des dires d’expert recueillis avec une méthodologie précise (WEBSTER *et al.* 2008 [64]) n’ont pas été accessibles. Ce choix a donc été porté à l’appréciation du modélisateur.

Il va sans dire que les résultats de l’analyse de sensibilité vont dépendre de ces choix originels. Les résultats obtenus par méthode de Monte Carlo, même probabilisés, ne peuvent se soustraire à la “vision du monde” du chercheur, qui peut considérer par exemple que le prix futur des énergies est soumis à beaucoup ou peu d’incertitudes. D’une certaine façon, le problème du choix des paramètres est déplacé en amont : du choix des paramètres eux-mêmes au choix des distributions de paramètres. Cependant nous ne ferons pas d’“analyse de sensibilité de l’analyse de sensibilité”.

Certaines valeurs de paramètres tirées aléatoirement pourraient ne pas avoir de sens (par exemple un taux d’information négatif) ou bien rendre le modèle instable. Des garde-fous ou valeurs seuils ont donc été choisies (là aussi arbitrairement). Le choix des écart-types a été tel que le recours à ces valeurs seuils soit peu fréquent <sup>33</sup>.

Les lois de distribution des paramètres sont résumés dans la table 8 ( $\mathcal{N}(m, \sigma)$  signifie loi normale de moyenne  $m$  et d’écart-type  $\sigma$ ).

Ayant retenu des simulations précédentes que la calibration des coûts intangibles échouait toujours lorsque  $\nu < 5$  et parfois lorsque  $\nu > 15$ , on corrige la loi de Pois-

<sup>33</sup>. elles sont situés au delà de deux ou trois écart-types par rapport à la valeur de référence, et on rappelle que pour  $X \sim \mathcal{N}(0, 1)$ ,  $P(|X| > 2) \simeq 4.6\%$  et  $P(|X| > 3) \simeq 0.27\%$

Paramètre	Loi	Garde-fou
Taux croissance prix énergie	$\mathcal{N}(1\%, 0, 5\%)$	aucun
Coûts rénovation	$(1 + k)C_{INV}$ , où $k \sim \mathcal{N}(0, 0.2)$	-0,9 (pour $k$ ) (min)
Taux réno initial	$\mathcal{N}(3\%, 1\%)$	0.5% (min)
Taux apprentissage	$\mathcal{N}(10\%, 4\%)$	0% (min)
Taux information	$\mathcal{N}(25\%, 10\%)$	0% (min)
Part variable IC	$\mathcal{N}(80\%, 5\%)$	95% (max)
Taux actu $PO_{MI}$	$\mathcal{N}(8\%, 2\%)$	2% (min)
Taux actu $PB_{LC}$	$\mathcal{N}(55\%, 10\%)$	10% (min)
$\nu$	$2 + Poisson(6)$ (avec corrections)	1 (min)
Courbe de facteur de service	uniforme sur chacune des possibilités	

TABLE 8 – Lois des paramètres servant à l’analyse de sensibilité

son de la façon suivante : si  $\nu$  vaut 2, 3 ou est supérieur à 15, on lui “réaffecte” la valeur 7. Si  $\nu$  vaut 4, on lui réaffecte la valeur 8. La moyenne de cette distribution est 8,2.

Les tirages des paramètres sont indépendants les uns des autres, ces derniers sont donc complètement décorrélés. La décorrélation des paramètres est une hypothèse qui s’impose ici faute de données et par souci de simplification. Une corrélation des paramètres entraîne moins d’incertitudes sur les résultats finaux (BEUGIN et JACCARD 2011 [10]).

Pour la courbe de facteur de service, trois versions sont utilisées. Les deux premières (ancienne et nouvelle logistique) ont la forme

$$Fact_{service} = conso_{min} + \frac{conso_{max} - conso_{min}}{1 + a \exp(bpp - c)}$$

avec  $p$  le prix de l’énergie,  $\rho$  la consommation conventionnelle (en kWh/m<sup>2</sup>/an),  $a = 4$ ,  $b = 0.33$ ,  $c = 4.22$ ,  $conso_{min} = 0.4$ ,  $conso_{max} = 1.25$ , pour l’ancienne logistique et  $a = 1$ ,  $b = 2$ ,  $c = 1.8$ ,  $conso_{min} = 0.45$ ,  $conso_{max} = 1.45$  pour la nouvelle.

La troisième (élasticité constante) a la forme :

$$Fact_{service} = K(pp)^e$$

avec  $K = 2,72$  et  $e = -0,505$ .

Remarque dans figure 11 : le fait que la courbe ancienne logistique soit en dessous des deux autres est corrigé par la calibration à l’année de base. En effet un coefficient correctif est appliqué à la consommation des classes de logements selon l’énergie de chauffage (sauf bois), pour que la consommation d’électricité, gaz et fioul correspondent aux consommations réelles<sup>34</sup> (45, 157 et 75 TWH respectivement, CEREN 2010 [14]). Un coefficient correctif supérieur à un (respectivement inférieur à un) déplace la courbe d’utilisation vers le haut (respectivement vers le bas).

#### 4.2.1 Autres paramètres corrélés

La corrélation de certains paramètres résulte d’un compromis entre :

- Faire intervenir plus de paramètres dans l’analyse de sensibilité.
- Ne pas avoir trop de paramètres indépendants pour ne pas avoir trop de simulations à effectuer.

<sup>34</sup>. Ces coefficients sont calculés à l’année de base puis gardés tels quel sur toute la durée de la simulation

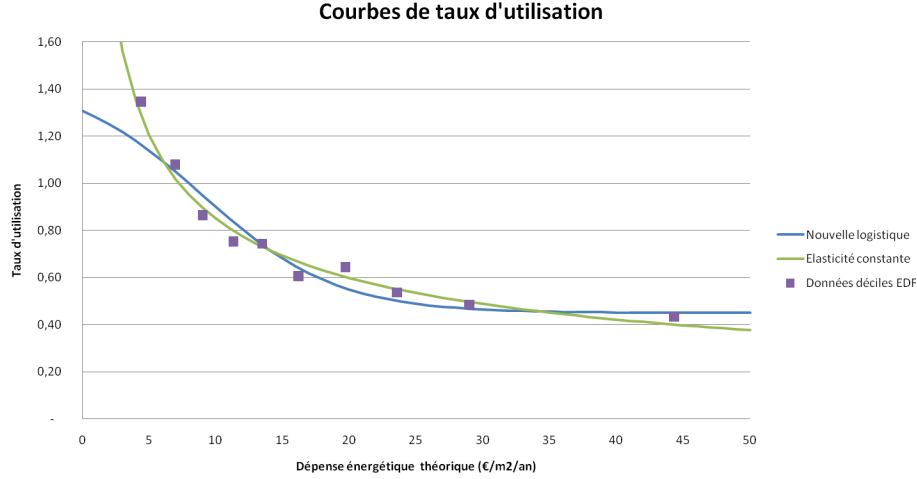


FIGURE 11 – Courbes d’utilisation utilisées dans l’analyse de sensibilité

Ce sont :

- Le taux d’apprentissage dans le neuf (valeur référence de 15% pour le neuf contre 10% pour l’existant). Si on note  $LR_{existant}$  la valeur tirée aléatoirement, on a  $LR_{neuf} = \frac{LR_{existant}}{10\%} 15\%$ . Il s’agit d’une simple proportionnalité.
- Le taux d’actualisation  $PB_{MI}$ , respectivement  $PO_{LC}$  (valeur réf 45% et 15%) est relié de la même façon au taux d’actualisation  $PB_{LC}$ , respectivement  $PO_{MI}$  (valeur réf 55% et 8%). Pour cette raison on note par la suite de façon groupée les paramètres PO et PB.

## 5 Distribution des résultats

Tous les résultats sont donnés sous la forme de trois courbes : une représentant la valeur moyenne, une représentant la valeur haute (95<sup>ème</sup> centile) et une autre représentant la valeur basse (5<sup>ème</sup> centile). Cela signifie donc que 90% des valeurs sont situées entre les deux courbes extrêmes. Une autre représentation (pour voir la dispersion de la distribution plus que la valeur médiane), est le coefficient de variation, à savoir le ratio écart-type sur moyenne.

La distribution statistique peut donner une “illusion de précision”. On pourrait penser que, un peu à la manière d’un test statistique, les sorties du modèle ont dans l’absolu 90% de chances de se trouver entre les deux courbes extrêmes. Il faut bien garder à l’esprit que les trois courbes obtenues sont entièrement dépendantes des distributions de paramètres, en plus de dépendre des hypothèses de modélisation.

On peut voir sur les figures 13 et 16 que l’incertitude est plus grande pour l’énergie finale réelle que pour l’énergie finale conventionnnelle. En effet, les incertitudes sur le facteur de service (choix de la courbe, mais aussi prix des énergies) s’ajoutent aux incertitudes sur l’efficacité. On peut également voir que la distribution n’est pas tout à fait symétrique : la courbe “moyenne” est plus proche de la “valeur basse” que de la “valeur haute”. Cela s’explique par les rendements décroissants : comme les rénovations les plus rentables se font en premier, il faut des paramètres de plus en plus “avantageux” pour



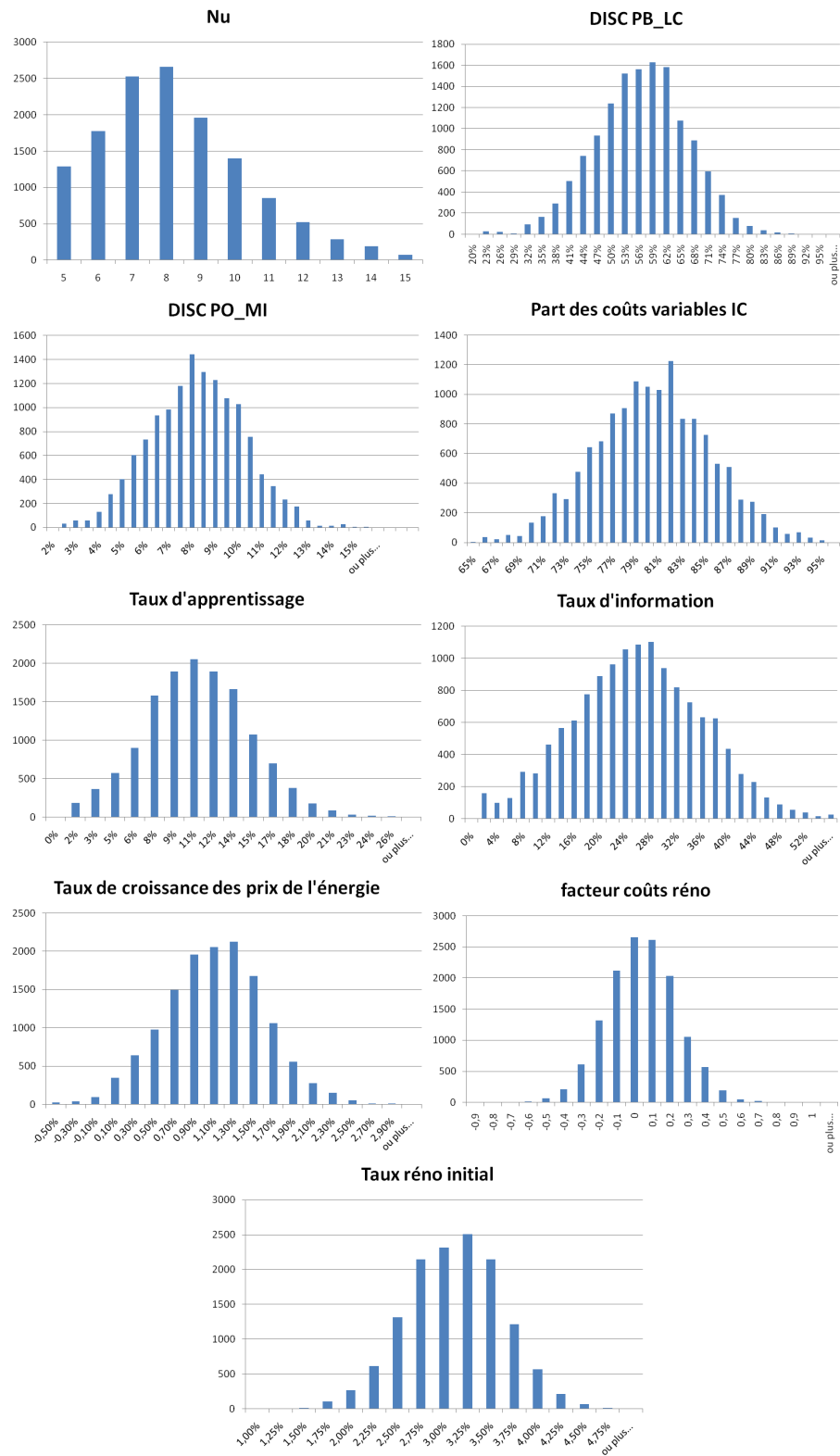


FIGURE 12 – Histogrammes des tirages de valeurs pour les différents paramètres

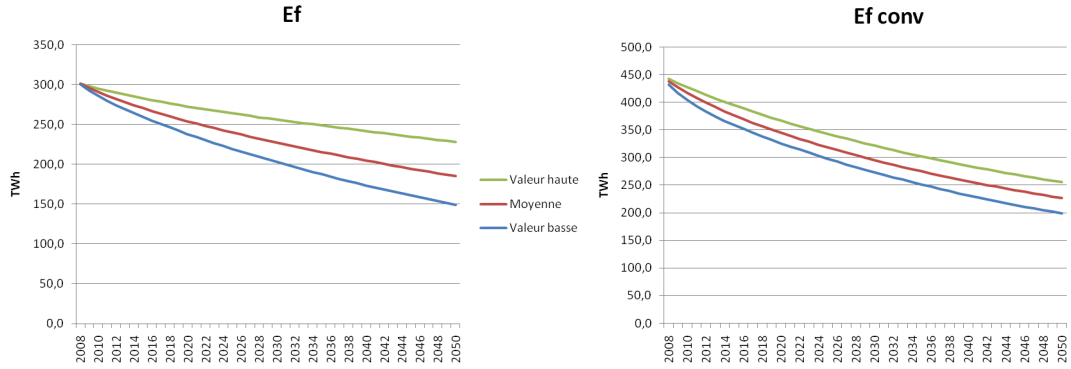


FIGURE 13 – Distribution de la consommation d'énergie réelle et conventionnelle

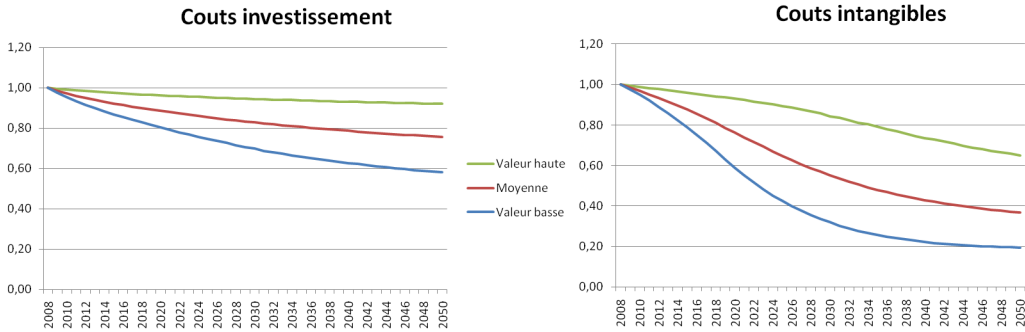


FIGURE 14 – Résultats probabilisés : coûts de rénovation et coûts intangibles

économiser la même quantité d'énergie.

Les coûts intangibles ont également une plus grande plage de variation que les coûts d'investissements (figures 14 et 16), ceci parce qu'on a autorisé une plus grande variation au taux d'information qu'au taux d'apprentissage (cf tableau 8) et qu'en plus on fait varier la part variable des coûts intangibles.

Le taux de rénovation est le seul paramètre dont la dispersion diminue au cours du temps (figure 16).

## 6 Analyse de sensibilité sur les paramètres

### 6.1 Méthode

Elle se base sur l'utilitaire d'analyse de variance d'Excel, qui permet de déterminer par un test type Student si deux échantillons suivent la même loi de probabilité. Voici la méthode.

Pour chaque paramètre  $\theta_i$ , on subdivise l'échantillon en deux : tous ceux pour lesquels  $\theta_i > \theta_{i,M}$  où  $\theta_{i,M}$  est la valeur médiane, et tous ceux pour lesquels  $\theta_i < \theta_{i,M}$ . Le grand nombre de simulations assure que dans les deux sous-échantillons, les autres paramètres  $\theta_j$  ont la même distribution. *Ces derniers ne diffèrent que sur un seul point : la distribution du paramètre  $\theta_i$*  (par exemple un sous-échantillon où le taux de rénovation initial est

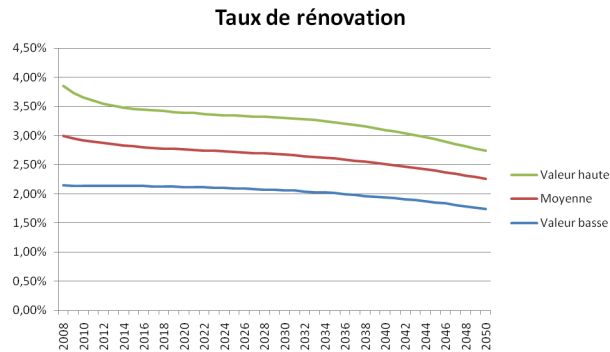


FIGURE 15 – Résultats probabilisés : taux de rénovation

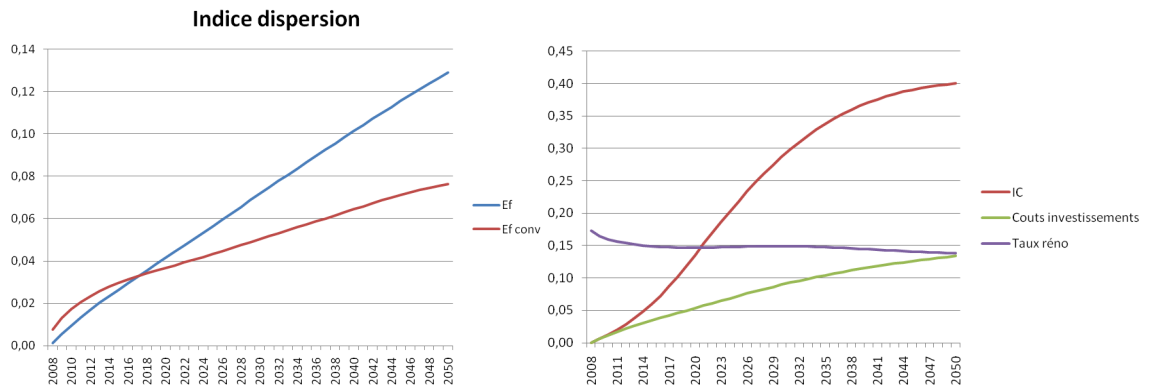


FIGURE 16 – Coefficient de variation des différents paramètres de sortie (I)

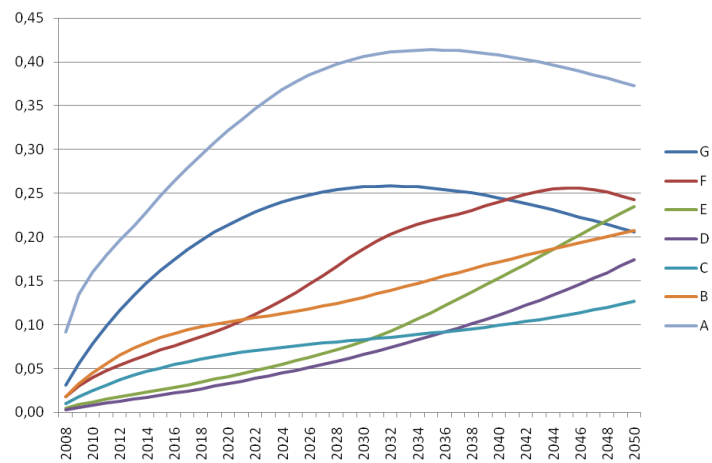


FIGURE 17 – Coefficient de variation des différentes sorties (II)

EF CONV 2050	F	Proba	Moy $\theta > \theta_M$	Moy $\theta < \theta_M$
Taux réno ini	7607,3	$<10^{-5}$	217,4	236,8
Taux croissance éner	1669,9	$<10^{-5}$	221,8	232,0
Taux d'apprentissage	1532,7	$<10^{-5}$	222,0	231,8
Taux information	179,9	$<10^{-5}$	225,2	228,6
Facteur coûts réno	65,5	$<10^{-5}$	228,0	225,9
DISC PO	58,5	$<10^{-5}$	227,9	225,9
DISC PB	34,2	$<10^{-5}$	227,7	226,2
Part IC var	22,8	$<10^{-5}$	226,3	227,5
Nu	1,9	0,16	226,4	226,8
Courbe AL/NL	0,2	0,69	227,0	226,8
Courbe NL/EC	0,1	0,78	226,8	226,9
Courbe EC/AL	0,0	0,91	227,9	227,0

TABLE 9 – Résultats analyse variance :  $Ef_{conv}$  2050

plutôt haut et un autre où il est plutôt bas). On applique alors l'analyse de variance à ces deux sous-échantillons sur un critère (par exemple la consommation d'Energie Finale en 2050).

La valeur du coefficient  $F$  de Student donne alors l'importance de notre paramètre sur le critère en question : plus il est grand, et plus les deux sous-échantillons ont des distributions "éloignées".

Cette méthode a été développée par l'auteur pour tirer parti des simulations effectuées précédemment par la méthode Monte Carlo. Pour voir les résultats d'une analyse de variance plus "classique", voir partie 7. Elle a l'avantage de voir l'influence d'un paramètre lorsque tous les autres bougent également. L'analyse de sensibilité prend donc en compte des effets d'interaction entre les paramètres.

## 6.2 Résultats

Les résultats sont donnés par ordre décroissant du coefficient  $F$ . Au lieu d'utiliser le critère le plus évident (la consommation d'énergie finale) on regarde l'énergie finale conventionnelle  $Ef_{conv}$  et le facteur de service afin de pouvoir mieux discerner l'effet des paramètres sur l'efficacité d'une part et la sobriété d'autre part. On regarde également ces deux critères à deux dates : 2020 et 2050 pour pouvoir discerner les effets de *long terme* et les effets de *court terme*.

L'analyse de variance d'excel compare deux sous-échantillons. Comme il y a trois courbes de facteur de service différentes, on doit les comparer deux à deux. AL, NL et EC signifient respectivement ancienne logistique, nouvelle logistique et élasticité constante.

Remarque : dans tous les tableaux, Moy  $\theta > \theta_M$  signifie moyenne du sous-échantillon dont le paramètre  $\theta$  est au-dessus de la médiane. Proba signifie la probabilité que les deux sous-échantillons n'aient pas la même distribution statistique. Les énergies sont en TWh.

## 6.3 Remarques générales

La valeur du coefficient  $F$  dépend de la taille de l'échantillon : plus ce dernier est gros, plus le test statistique a de chances de devenir significatif et plus la valeur du coefficient  $F$  est grande (à titre indicatif, une augmentation de x% de la taille de l'échantillon entraîne une augmentation de  $F$  d'environ x% aussi).

EF CONV 2020	F	Proba	Moy $\theta > \theta_M$	Moy $\theta < \theta_M$
Taux réno ini	17779,9	$<10^{-5}$	335,8	353,7
DISC PO	938,0	$<10^{-5}$	347,5	341,9
Taux croissance éner	201,2	$<10^{-5}$	343,4	346,1
Taux information	67,4	$<10^{-5}$	344,0	345,5
Taux apprentissage	55,4	$<10^{-5}$	344,0	345,4
DISC PB	41,4	$<10^{-5}$	345,3	344,1
Facteur coûts réno	8,9	0,003	344,4	345,0
Nu	2,7	0,10	344,8	344,5
Part IC variable	0,2	0,62	344,8	344,7
Courbe NL/EC	0,1	0,744	344,7	344,8
Courbe AL/NL	0,1	0,751	344,8	344,7
Courbe EC/AL	0,0	0,991	344,8	344,8

TABLE 10 – Résultats analyse variance :  $Ef_{conv}$  2050

Facteur service 2050	F	Proba	Moy $\theta > \theta_M$	Moy $\theta < \theta_M$
Courbe NL/EC	22458,2	$<10^{-5}$	0,77	0,92
Courbe AL/NL	4845,1	$<10^{-5}$	0,79	0,91
Courbe EC/NL	4361,8	$<10^{-5}$	0,85	0,77
Taux croissance éner	4131,3	$<10^{-5}$	0,92	0,85
Taux réno ini	1812,2	$<10^{-5}$	0,87	0,83
DISC PO	243,7	$<10^{-5}$	0,85	0,85
Facteur coût réno	23,2	$<10^{-5}$	0,85	0,85
DISC PB	14,4	$<10^{-5}$	0,85	0,85
Nu	4,7	0,01	0,85	0,85
Taux information	3,2	0,02	0,85	0,85
Part IC var	0,1	0,23	0,85	0,85
Taux apprentissage	0,1	0,51	0,85	0,85

TABLE 11 – Résultats analyse variance : Facteur service 2050

Facteur service 2020	F	Proba	Moy $\theta > \theta_M$	Moy $\theta < \theta_M$
Courbe NL/EC	22458,2	$<10^{-5}$	0,72	0,79
Courbe NL/AL	4845,1	$<10^{-5}$	0,75	0,72
Courbe EC/AL	4361,8	$<10^{-5}$	0,79	0,75
Taux croissance éner	4131,3	$<10^{-5}$	0,74	0,77
Taux réno ini	1812,2	$<10^{-5}$	0,76	0,74
DISC PO	243,7	$<10^{-5}$	0,75	0,75
Facteur coût réno	23,2	$<10^{-5}$	0,75	0,76
DISC PB	14,4	$<10^{-5}$	0,75	0,75
Nu	4,7	0,91	0,75	0,75
Taux information	3,2	0,07	0,75	0,75
Part IC var	0,1	0,78	0,75	0,75
Taux apprentissage	0,1	0,81	0,75	0,75

TABLE 12 – Résultats analyse variance : Facteur service 2020

Avec 18000 simulations et en coupant l'échantillon en deux, on a donc 9000 valeurs par sous-échantillons, ceci à deux exceptions. Pour nu d'une part (7000 et 7400, car la variable est discrète et la médiane est 8, les résultats lorsque nu vaut 8 ne sont donc pas comptabilisés), et pour les courbes d'utilisation d'autre part (6000 de chaque). Ceci a pour conséquence qu'il est plus délicat de comparer l'importance de ces paramètres par rapport aux autres.

Un certain nombre de remarques peuvent être faites :

- Tout d'abord l'effet de valeurs hautes/basses des paramètres sur la consommation énergétique conventionnelle (et donc l'efficacité) est conforme à ce qui est attendu. Voir partie 4.1 pour le détail des mécanismes.
- Trois paramètres sortent très clairement du lot. Il s'agit du taux de croissance des prix de l'énergie, de la courbe de facteur de service et du taux de rénovation initial. Le taux de croissance du prix des énergies est prépondérant sur la sobriété (et davantage sur le long terme) tandis que le taux de rénovation initial l'est sur l'efficacité (et davantage sur le court terme).
- Nu et Part IC var ont toujours très peu d'importance. Cela peut être dû au fait que leur plage de variation n'est pas très importante<sup>35</sup> (le paramètre nu compris entre 6 et 15 pour minimiser les erreurs de calibration, la Part IC var varie entre 70% et 95% environ) ou tout simplement au fait que ces paramètres n'ont qu'un rôle mineur (par exemple Part IC var qui paraît a priori moins important que le taux d'information).
- Les courbes de facteur de service n'ont (ce qui est rassurant) aucun impact sur l'efficacité, mais un impact important sur la sobriété (conso réelle). Comparativement aux autres paramètres, cet effet est plus marqué sur le court terme. Ceci est cohérent, l'effet des courbes de facteur de service sur la consommation étant instantané tandis que les autres paramètres mettent du temps à avoir un impact (typiquement les taux d'apprentissage et d'information). Les valeurs obtenues avec l'"ancienne logistique" sont presque toujours comprises entre les valeurs de la "nouvelle logistique" (consommation plus faible) et de l'"élasticité constante" (consommation plus forte). Voir partie 6.5 pour étude plus fine.
- Les coûts de rénovation (fact coûts réno) ont une influence faible sur le court terme mais un peu plus importante sur le long terme. Une augmentation des coûts de rénovation est automatiquement "corrigée" par des coûts intangibles appropriés lors de la calibration à l'année de base, et c'est lorsque ces derniers décroissent au cours du temps que l'importance de ce facteur se fait sentir. Ainsi, ce paramètre qui semble crucial par intuition (si les coûts de rénovation sont plus faibles alors on rénove plus) et pour les acteurs sur le terrain n'est que secondaire dans Res-IRF du fait du calibrage.
- Les taux d'actualisation ont davantage d'importance à court terme (car à long terme les rénovations se font de toute façon), et davantage sur l'efficacité (ce qui est normal car ce paramètre joue en premier lieu sur les rénovations) que sur la sobriété. Les taux d'actualisation pour les PO ont plus d'influence que ceux pour les PB. La figure 18 donne un élément d'explication : le coefficient d'actualisation<sup>36</sup> (cf équation (5) page 22) est beaucoup plus sensible aux variations pour des valeurs faibles (les taux d'actualisation varient entre 4% et 12% pour  $PO_{MI}$  et entre 40% et 80% pour  $PB_{LC}$ , cf figure 12).

35. Les travaux sur la sensibilité des paramètres réalisés dans GIRAUDET *et al.* 2010, avec nu valant 0 ou 100 avaient conclu également à peu d'influence de ce paramètre

36. Pour un paramètre *lifetime* valant 30 ans ici sur la figure

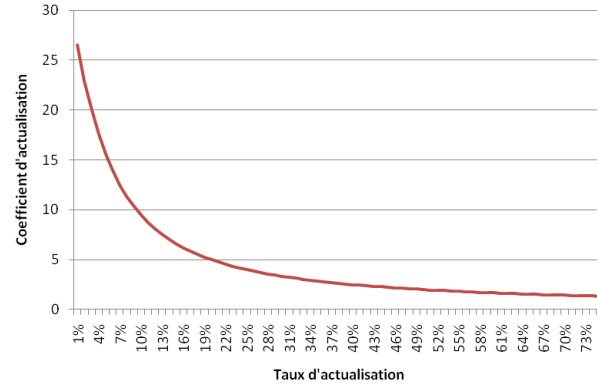


FIGURE 18 – Coefficient d'actualisation en fonction du taux d'actualisation

EF 2050	F	Proba	Moy $\theta > \theta_M$	Moy $\theta < \theta_M$
Taux croissance éner	12 560,0	$<10^{-5}$	175,2	210,0
Courbe NL/EC	6759,7	$<10^{-5}$	175,3	209,1
Courbe AL/NL	2133,6	$<10^{-5}$	193,6	175,3
Courbe EC/AL	1095,7	$<10^{-5}$	209,1	193,6
Taux réno ini	325,0	$<10^{-5}$	189,0	196,2
Taux apprentissage	272,1	$<10^{-5}$	189,3	195,9
Facteur coûts réno	29,6	$<10^{-5}$	193,7	191,5
Taux information	27,5	$<10^{-5}$	191,5	193,7
Part IC var	4,9	0,03	192,2	193,1
Nu	1,7	0,19	192,8	192,2
DISC PO	0,5	0,48	192,7	192,5
DISC PB	0,3	0,58	192,7	192,5

TABLE 13 – Résultats analyse variance : Ef 2050

- Le taux d'apprentissage a globalement plus d'importance que le taux d'information mais ces deux paramètres présentent des caractéristiques très similaires. Ils ont plus d'importance sur le long terme (plus le temps passe, plus il y a déjà eu des rénovations, et plus la décroissance des coûts peut être importante) et sur l'efficacité que sur la sobriété.
- Dans le cas de la sobriété, le taux de croissance des prix de l'énergie et la courbe de facteur de service captent la majorité des fluctuations, reléguant les autres paramètres au second plan.

L'étude séparée sur les volets efficacité/sobriété permet alors de mieux apprécier les résultats lorsqu'on combine les deux, à savoir l'énergie finale réelle.

La courbe de facteur de service et le taux de croissance des prix des énergies sortent clairement du lot pour expliquer les variations d'énergie finale calculées avec le modèle. Les nuages de point figure 19 permettent de le visualiser (en comparaison l'impact du taux de rénovation initial sur la consommation d'énergie en 2050 est difficilement visible).

EF 2020	F	Proba	Moy $\theta > \theta_M$	Moy $\theta < \theta_M$
Courbe NL/EC	18730,9	$<10^{-5}$	248,8	271,0
Taux croissance éner	5876,1	$<10^{-5}$	253,2	266,1
Courbe EC/AL	4207,4	$<10^{-5}$	271,0	259,2
Courbe AL/NL	3944,5	$<10^{-5}$	259,2	248,8
Taux réno ini	933,1	$<10^{-5}$	256,8	262,5
DISC PO	47,1	$<10^{-5}$	260,3	259,0
Taux apprentissage	33,4	$<10^{-5}$	259,1	260,2
Taux information	18,7	$<10^{-5}$	259,2	260,1
DISC PB	16,1	$<10^{-5}$	260,3	259,5
Nu	11,8	0,001	260,0	259,2
Facteur coût réno	7,1	0,008	259,9	259,4
Part IC var	0,0	0,957	259,6	259,6

TABLE 14 – Résultats analyse variance : Ef 2020

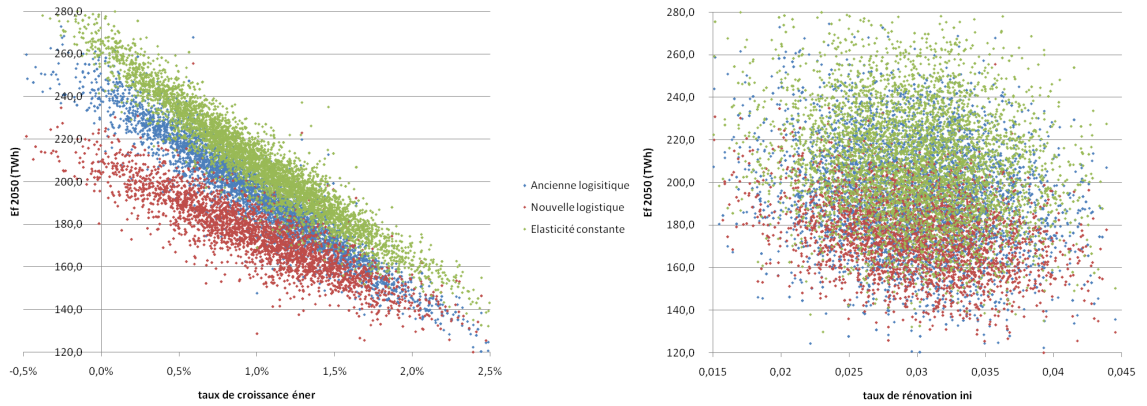


FIGURE 19 – Visualisation de l'impact du taux de croissance du prix des énergie et du taux de rénovation initial sur la consommation d'énergie en 2050



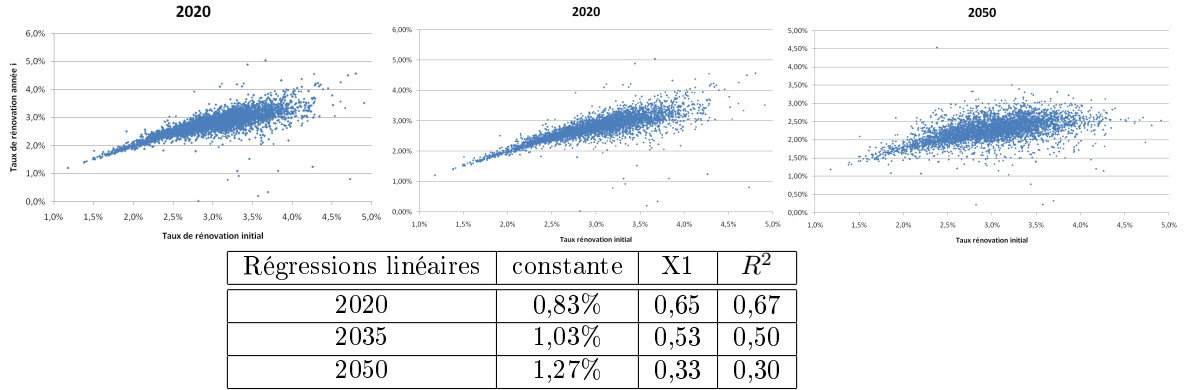


FIGURE 20 – Taux de rénovation en 2020, 2035 et 2050 en fonction du taux de rénovation initial

#### 6.4 Inertie du taux de rénovation par rapport au taux de rénovation initial

Même si figure 19 l’influence du taux de rénovation initial n’est pas visible, les résultats du tableau 13 suggèrent que ce paramètre qui pourrait paraître secondaire est en réalité déterminant.

La figure 20 représente le taux de rénovation à l’année  $i$  en fonction du taux de rénovation initial. On voit nettement que l’influence du taux de rénovation initial sur le taux de rénovation à l’année  $i$  est très importante, d’autant plus que ce taux initial est petit et qu’on est proche de l’année de départ (attention les figures 19 et 20 ne sont pas comparables : dans un cas c’est la consommation d’énergie finale qui est en ordonnée et dans un autre c’est le taux de rénovation).

Cela s’explique par le calibrage des coûts intangibles et de la courbe de rénovation. Ce calibrage “impose” une certaine trajectoire de consommation d’énergie dont on ne peut s’écarter que si d’autres paramètres (et surtout le taux de croissance des prix des énergies) sont suffisamment éloignés de leur valeur moyenne pour “forcer” le modèle. Au final le modèle présente une inertie très importante puisque malgré la variation de tous les autres paramètres, le taux de rénovation initial a un impact sur la consommation d’énergie jusqu’en 2050.

Le calcul endogène du taux de rénovation serait donc un peu trop déterminé par la condition initiale.

#### 6.5 Influence des différentes courbes d’utilisation

Le choix de la courbe d’utilisation a un impact réel. Dans un cas (courbe “nouvelle logistique”), on a une réduction de 42% de la consommation d’énergie finale en 2050 tandis que dans l’autre la réduction est de seulement 33% (courbe “élasticité constante”).

Cette importance est tout à fait logique. Dans notre modèle, la courbe d’utilisation est le seul vecteur permettant de modéliser l’effet rebond. Différentes “visions du monde” quant à cet effet rebond induisent nécessairement des résultats très différents, surtout lorsqu’on se place à long terme. La courbe isoélastique suppose que quel que soit le progrès réalisé, l’ajustement est le même, au contraire de la forme logistique où il y a une saturation dans les “bonnes” étiquettes. Il se trouve ici que la courbe isoélastique donne

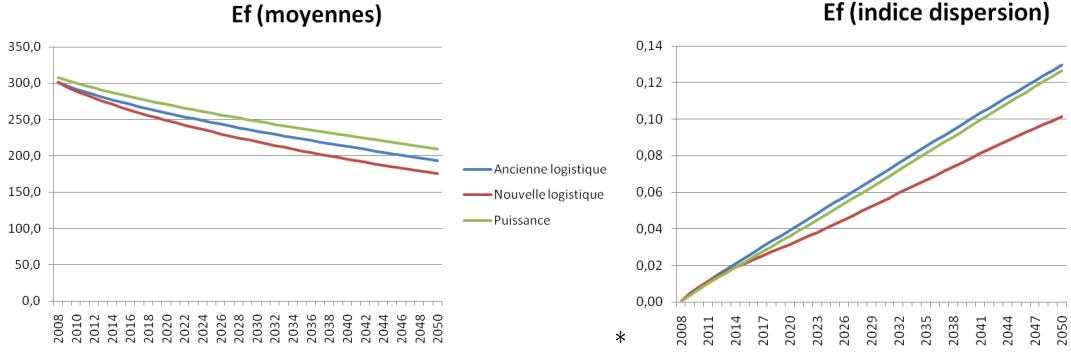


FIGURE 21 – Moyenne et coefficient de variation de Ef pour les trois courbes d'utilisation

des résultats plus pessimistes que les courbes logistiques (ceci est dû au paramétrage d'une part, et au fait que l'effet rebond "persiste" lorsque les logements sont bien isolés d'autre part).

Ce que l'on peut noter ici, c'est que lorsqu'on utilise la courbe "nouvelle logistique", les résultats sont moins sensibles aux perturbations (essentiellement aux perturbations des prix de l'énergie).

Ces remarques sont visualisables sur la figure 19 : courbe ancienne logistique comprise entre élasticité constante et nouvelle logistique, pente des nuages de points (le terme est peut-être un peu abusif) reflétant la sensibilité aux variations des prix de l'énergie.

## 7 Analyse de sensibilité simplifiée

### 7.1 Paramètres et politiques

L'analyse de variance précédente a l'avantage d'estimer l'impact d'un paramètre *lorsque tous les autres varient également*, mais donne des résultats difficiles à visualiser (au contraire d'une analyse de variance "classique") et ne prend pas en compte les différentes politiques.

Pour étudier ces aspects on fait une autre analyse de sensibilité, plus simple. Pour trois types de politiques (Business As Usual, CIDD et taxe carbone) et pour deux courbes d'utilisation (nouvelle logistique et élasticité constante), on fait varier *un seul paramètre à la fois* (tous les autres étant à la valeur référence)

Ce paramètre varie de quatre façons : il prend sa valeur référence plus ou moins un ou deux écart-types (du tableau 8). Cela fait au total  $3 \times 2 \times (1 + 8 \times 4) = 198$  simulations (3 politiques, 2 types de courbes, 1 situation de référence et 8 paramètres variant de 4 façons différentes).

Pour un paramètre de sortie  $Y$  (par exemple la consommation d'énergie en 2050), la part de variance expliquée par le paramètre  $i_1$  vaut alors (à politique  $\pi$  et courbe d'utilisation  $\kappa$  donnés) :

$$Var_{(\pi, \kappa)}(i_1) = \frac{\sum_{i_1=\pm 1, 2} (Y_{(\pi, \kappa), i_1} - Y_{(\pi, \kappa), i_1=0})^2}{\sum_{\substack{j=1..9 \\ i_j=\pm 1, 2}} (Y_{(\pi, \kappa), i_j} - Y_{(\pi, \kappa), i_j=0})^2} \quad (7)$$

(On a bien  $\sum_{j=1..9} Var_{(\pi,\kappa)}(i_j) = 1$ ). Les résultats sont visibles figure 22.

On peut faire un certain nombre de commentaires.

- Tout d’abord, indépendamment du choix de la courbe d’utilisation et de la politique, *les remarques faites précédemment sur l’importance des différents paramètres tiennent toujours* (et sont peut-être plus “visibles” sur les graphiques). Les deux paramètres prépondérants sont le taux de croissance du prix des énergies et le taux de rénovation initial. On retrouve que le premier est davantage influent sur le long terme tandis que le premier l’est sur le court terme. Par ailleurs, le taux d’apprentissage (long terme) et le taux d’actualisation chez les propriétaires occupants (court terme) ont une importance secondaire mais non négligeable. Les autres paramètres n’ont en revanche quasiment aucune influence.
- Concernant les courbes de facteur de service, on retrouve le fait que *la courbe d’utilisation “élasticité constante” modélise un effet rebond de plus grande importance*. En effet dans le cadre de l’effet rebond “classique”, une baisse du prix de l’énergie est automatiquement “absorbée” par un gain de confort, ce gain de confort étant d’autant plus grand que l’effet rebond est important. Mais cela marche aussi dans l’autre sens : une hausse des prix induit une baisse de la consommation. Ainsi avec un effet rebond plus important, la même variation des prix de l’énergie a un impact plus important sur la consommation. Or lorsque la courbe d’utilisation “élasticité constante” est utilisée, le paramètre taux de croissance des prix de l’énergie prend beaucoup plus d’importance (au détriment du taux de rénovation initial).
- L’importance relative des différents paramètres n’est pas modifiée de manière significative par la politique adoptée. On peut toutefois soulever deux points. Premièrement, les coûts de rénovations n’ont d’importance (à court terme, et une importance non négligeable) qu’en présence de CIDD. Cela s’explique par le fait que la calibration se fait en l’absence de CIDD. Ainsi, même avec la correction apportée par l’ajout de coûts intangibles, la subvention apportée par le CIDD est d’autant plus incitative que les coûts de rénovation initiaux sont bas. Deuxièmement, avec les différentes politiques, le prix des énergies a un impact plus ou moins fort (et donc le taux de rénovation initial a un impact plus ou moins faible, puisque ce dernier “comble” la perte d’influence du paramètre prix des énergies).

Pour comprendre les résultats il faut rappeler que le prix des énergies impacte la consommation par deux leviers. Le premier est la sobriété : pour un logement ayant des caractéristiques thermiques données, le prix de l’énergie détermine la consommation (par le biais de la courbe de facteur de service). Le second est l’efficacité : le prix de l’énergie est un déclencheur de travaux d’efficacité énergétique : certaines rénovations ne sont réalisées de façon significative que si le prix de l’énergie est suffisamment élevé.

- L’importance relative des prix de l’énergie est moins grande en présence de CIDD que pour le scénario BAU. Deux effets vont en fait en sens opposés, et l’un est plus fort que l’autre. D’une part, le parc est mieux isolé lors du scénario CIDD que lors du scénario BAU. Une même variation des prix de l’énergie entraîne donc une plus faible variation de la consommation (sobriété). D’autre part, la subvention fait baisser les coûts réels des rénovations, et les prix de l’énergie prennent alors relativement plus d’importance dans le choix de rénover ou pas (efficacité).
- L’importance relative des prix de l’énergie est moins grande en présence de taxe que pour le scénario BAU. Cette fois ci les effets sur l’efficacité et sur la sobriété vont dans le même sens. D’une part, la taxe est un déclencheur de travaux “indépendant”

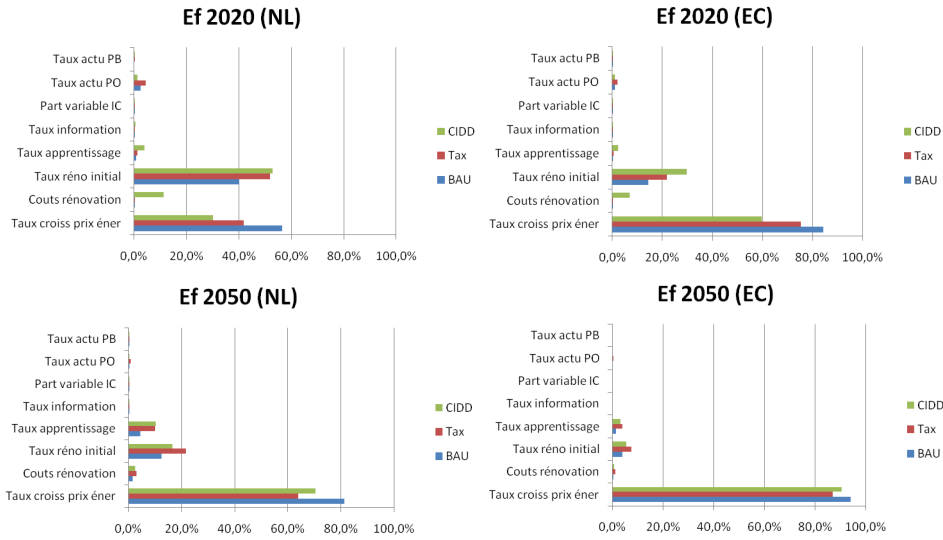


FIGURE 22 – Résultats de l’analyse de variance simplifiée selon les courbes de taux d’utilisation et les politiques

du prix des énergie<sup>37</sup>. D’autre part le paramètre “taux de croissance du prix des énergies” détermine l’augmentation du prix *hors taxe*. La variation des prix taxés (ressentie par l’utilisateur) est de moindre ampleur que celle des prix hors taxe (déterminées par le taux de croissance des prix des énergies), le taux de croissance du prix des énergie perd donc de l’importance sur son rôle de “déclencheur de sobriété”.

- Pour ce qui est de la comparaison CIDD/taxe, on peut voir que les effets décrits plus hauts sont plus importants avec le CIDD à court terme, mais avec la taxe à long terme.

En résumé, *l’application de politiques diminue l’incertitude de l’impact du prix des énergies sur le nombre de rénovations à venir*, c’est donc un moyen de se couvrir contre ce risque.

## 7.2 Analyse de variance agrégée

Pour finir, on essaie de faire en sorte de comparer les “paramètres” “courbes” et “politiques” en même temps que les 8 précédents (ce qui est moins rigoureux mathématiquement mais donne des résultats faciles à visualiser).

Par rapport à la référence (courbe isoélastique, scénario BAU, paramètres à leur valeur de référence), les 8 paramètres ont quatre façons de varier (plus ou moins un ou deux écart-types), le paramètre “courbe” un seul (en prenant la courbe nouvelle logistique) et le paramètre “politiques” deux (CIDD et taxe).

Par conséquent pour le paramètre “courbe” (respectivement le paramètre “politiques”), on utilise l’équivalent de la formule ?? page ?? mais multiplié par 4 (respectivement 2). La somme totale au dénominateur est modifiée en conséquence pour que la somme des pourcentages de variance expliquée fasse bien un.

On aggrège aussi *temporellement* : on fait la moyenne de cette formule sur toutes les années de 2008 à 2050, en utilisant la même pondération pour toutes les années (cela

37. la taxe s’applique sur le contenu carbone et non sur le prix hors taxe

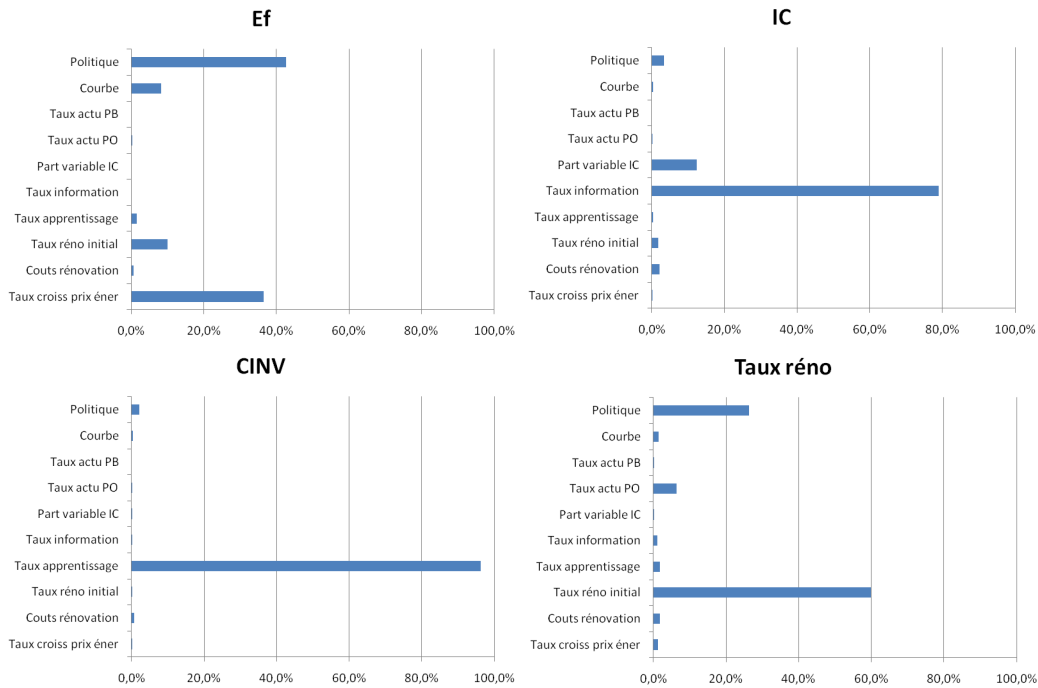


FIGURE 23 – Résultats de l'analyse de variance agrégée

permet de n'avoir qu'un seul graphique mais ne permet plus de distinguer les effets de long terme et les effets de court terme).

On fait ce calcul sur le paramètre Ef, mais aussi sur l'indice de Fischer des coûts intangibles et des coûts de rénovation, ainsi que sur le taux de rénovation. Les résultats sont sur la figure 23.

- Concernant l'énergie finale, on retrouve les paramètres importants qui avaient été mis en lumière précédemment : le taux de croissance des prix de l'énergie, le taux de rénovation initial et la courbe de facteur de service. On voit également, ce qui est intéressant, que *la politique est le "paramètre" ayant le plus d'importance*.
- Pour les coûts intangibles et les coûts de rénovation, on voit que les paramètres ayant un effet direct (taux d'apprentissage pour les coûts de rénovation, taux d'information et part variable des coûts intangibles pour les coûts intangibles) ont un impact plus fort que les autres paramètres qui agissent eux par effet indirect au travers du learning-by-doing et du learning-by-using (politique, taux de réno initial).
- Enfin, pour le taux de rénovation, on retrouve ce qui avait été mis en évidence dans la partie 6.4, à savoir le caractère prépondérant du taux de rénovation initial. On peut toutefois noter que la politique et le taux d'actualisation *PO* ont un effet non négligeable.

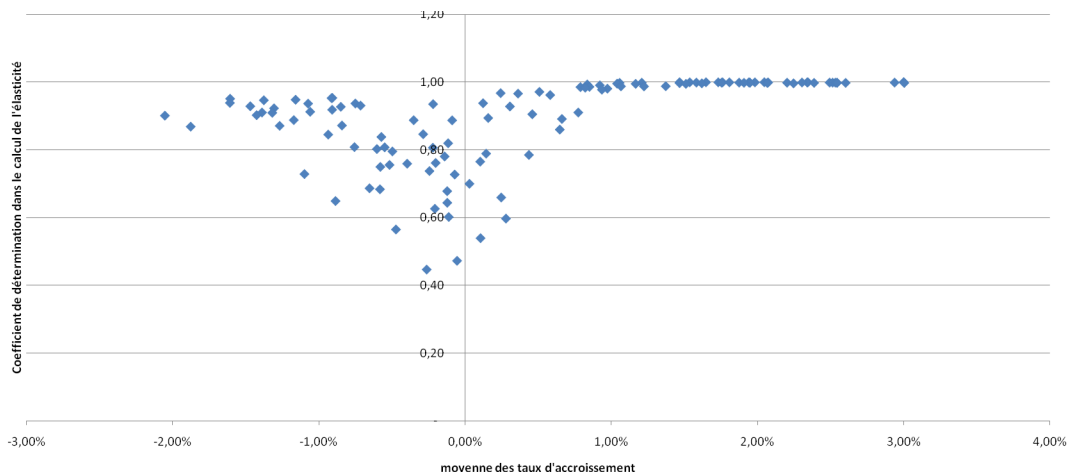


FIGURE 24 – Coefficient  $R^2$  en fonction de la moyenne des taux d'accroissement

## 8 Élasticités-prix et influence du mode d'anticipation des prix

Cette partie se distingue des précédentes : elle explore les élasticités-prix que l'on calcule à partir des résultats du modèle et le rôle des anticipations des prix par les agents lors de travaux d'efficacité énergétique. On explore ainsi un peu plus en détail le rôle des prix des énergies qui a été révélé comme crucial par l'analyse de sensibilité.

*Dans cette partie, seuls les scenarios de prix varient d'une simulation à l'autre, tous les autres paramètres sont fixés.*

### 8.1 Élasticités-prix

#### 8.1.1 Méthode

Pour générer un scenario de prix, on tire des taux de croissance *annuels* suivant une loi normale. On prend toujours pour la loi normale un écart-type de 4%, tandis que pour la moyenne, on a -1%, 0%, 1% et 2% (30 pour chaque). On a donc 120 scenarios de prix en tout. Ces taux de croissance sont les mêmes pour toutes les énergies.

Dans ces simulations les prix de l'énergie sont donc volatils, au contraire des autres simulations où le taux de croissance du prix des énergies était le même pour toute la durée de la simulation.

On calcule ensuite les élasticités-prix en faisant une régression de  $\log(E_f)$  sur  $\log(p)$ .

Cette régression capte essentiellement l'effet des prix de l'énergie sur la *sobriété*, à travers la courbe d'utilisation<sup>38</sup>, mais aussi son effet sur l'*efficacité*, à savoir son potentiel de déclencher des travaux de rénovations<sup>39</sup>.

On peut voir figure 24 que le coefficient de la régression  $R^2$  est extrêmement proche de 1 lorsqu'on est dans des scenarios de croissance de l'énergie, qu'il est relativement bon

38. Courbe "ancienne logistique" pour ces simulations

39. Un autre travail distinguant élasticité de court terme/élasticité de long terme pourrait également être réalisé

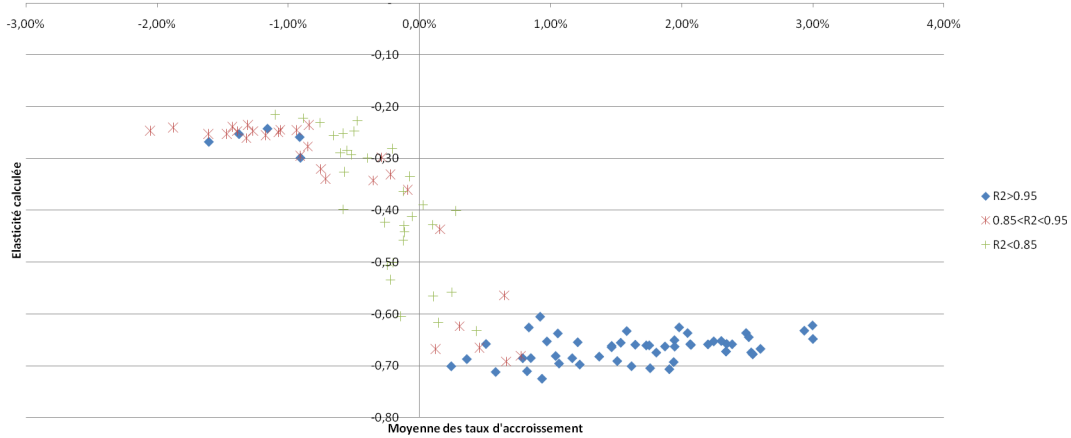


FIGURE 25 – Elasticités-prix calculées

(>0.9) lorsqu'on est dans des scenarios de décroissance de l'énergie mais entre les deux, on ne peut pas vraiment dire que ce calcul de l'élasticité ait beaucoup de sens.

Sur la figure 25, on peut voir l'asymétrie entre élasticité-prix calculées lorsque les prix croissent (-0.6/-0.7) et lorsqu'ils décroissent ( $\simeq -0.25$ ). En effet, concernant l'*efficacité*, la variation des prix de l'énergie détermine le nombre plus ou moins élevé de rénovations (mais il y en a toujours). Concernant la *sobriété*, cette variation est immédiatement répercutée sur la consommation par l'intermédiaire de la fonction d'utilisation.

L'efficacité énergétique augmente donc toujours, et les prix de l'énergie jouent sur cette vitesse d'augmentation, tandis que la sobriété peut augmenter ou diminuer selon le sens de variation des prix de l'énergie (ce qui est visible figure 26).

Ces asymétries se retrouvent donc naturellement dans le calcul des élasticités-prix. Les études empiriques montrent également une asymétrie des élasticités-prix dus aux irréversibilités des investissements dans l'efficacité énergétique (HAAS et SCHIPPER 1998 [28]).

## 8.2 Effet des modes d'anticipation des prix

On distingue trois possibilités pour le prix anticipé de l'énergie intervenant dans le calcul économique.

- Myope : l'individu suppose que le prix futur sera celui du présent.
- Parfaite : l'individu connaît le prix de l'énergie futur.
- Trend : l'individu fait la moyenne des taux de croissance des cinq dernières années, et suppose que l'énergie croîtra à ce taux dans le futur.

Les scenarios de prix sont les mêmes que précédemment.

Comme on peut le voir sur la figure 27, plus l'accroissement moyen des prix est important, plus les travaux d'efficacité énergétiques sont nombreux, et plus la consommation d'énergie finale conventionnelle est faible, ceci quel que soit le mode d'anticipation des prix des agents (comme on a pu le voir dans l'analyse de sensibilité précédente)..

Lorsque les prix de l'énergie baissent ou augmentent peu en moyenne, il n'y a pas vraiment de différences dans le nombre de travaux de rénovation quel que soit le mode d'anticipation des prix. En revanche lorsque l'augmentation des prix est forte, on voit que l'anticipation Trend aboutit à plus de rénovations que l'anticipation parfaite qui

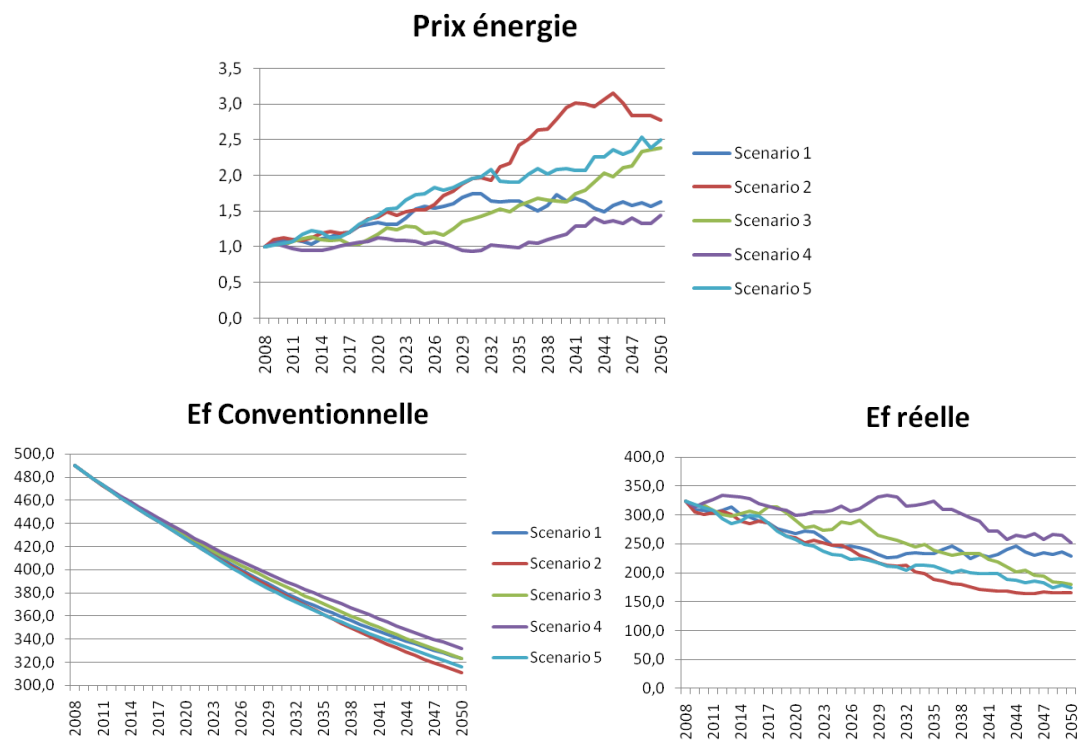


FIGURE 26 – Prix de l'énergie, consommations d'énergie finale réelle et conventionnelles selon différents scénarios

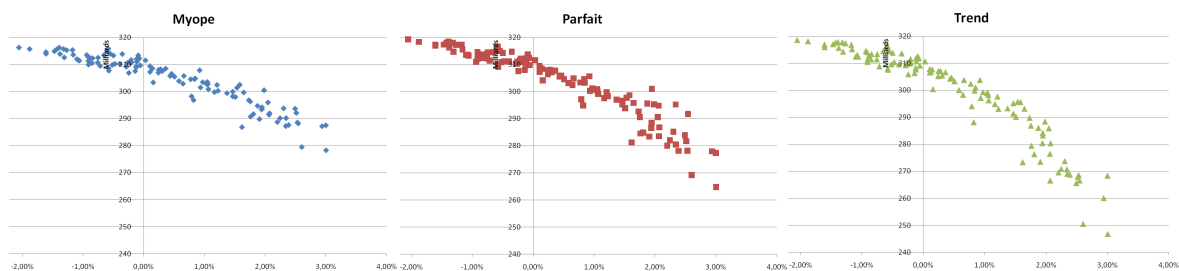


FIGURE 27 – Ef conventionnelle en 2050 en fonction de la moyenne des taux d'accroissement



elle-même aboutit à plus de rénovations que l’anticipation myope (pour les plus fortes hausses, on aboutit en 2050 à environ 255 TWh pour l’anticipation Trend, 270 TWh pour l’anticipation parfaite et 280 TWh pour l’anticipation myope).

En effet l’anticipation myope sous-estime la véritable montée des prix de l’énergie dans le futur (parfaitement intégrés dans une anticipation parfaite) tandis qu’une anticipation Trend peut la surestimer (si quelques années d’affilée on a des taux de croissance très élevés). En cas de “prévision catastrophique”, des travaux de rénovations très importants peuvent être alors effectués.

Lors de périodes où le prix de l’énergie augmente peu voire diminue, le déficit de rénovations dû à un optimisme passager (toujours par rapport à l’anticipation parfaite) existe mais reste moins important que l’excès de rénovation lors de flambée des prix de l’énergie. Les deux effets cumulés aboutissent à plus de rénovations dans des anticipations Trend.

## 9 Conclusion de l’analyse de sensibilité

Ce qui ressort avant tout de l’analyse de sensibilité, c’est le caractère prépondérant de trois paramètres : la courbe de facteur de service, le taux de croissance des prix des énergies et le taux de rénovation initial. Malgré toutes les fluctuations des autres paramètres, leur connaissance permet de prédire  $Ef_{2050}$  avec une bonne précision, ceci avec une simple régression linéaire<sup>40</sup> (équation ci-dessous et tableau 15).

$$Ef_{2050} = C + X_1\tau_{reno,ini} + X_2\tau_{croissance,ener} \quad (8)$$

A la fois déclencheur de travaux de rénovation et vecteur de sobriété énergétique, il est normal que le prix de l’énergie soit le paramètre numéro un dans la modélisation de la consommation d’énergie. Les nombreuses études empiriques le concernant, se basant généralement sur des calculs d’élasticités-prix de la demande, montrent qu’il est déterminant dans l’efficacité énergétique (LINAES et LABANDEIRA 2010 [42]). Son imprévisibilité incite donc à beaucoup de prudence dans la qualité des prévisions, surtout à long terme. Il aurait pu être intéressant de réaliser des études de sensibilité avec des taux de croissance différents pour chaque énergie afin d’étudier les effets de fuel switch et leurs impacts sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Cependant la modélisation du fuel switch nécessitant encore des améliorations (voir annexe 14), ainsi que les émissions dans le secteur électrique, il n’était pas judicieux de le faire à ce stade actuel de développement de Res-IRF.

D’autre part, la multitude de travaux empiriques confirmant l’importance et la difficulté d’estimation de l’effet rebond (SORELL et DIMITROPOULOS 2008 [59]) justifient le fait que le choix de la courbe d’utilisation ait un impact majeur sur la consommation prédite.

En revanche, ce qui est peut-être moins justifiable est l’importance du taux de rénovation initial. On touche ici du doigt les difficultés inhérentes à la modélisation hybride : la nécessité de calibrer le modèle sur des données réelles peut entraîner des conséquences parfois inattendues et souvent invisibles, ce qu’a mis en lumière ici cette analyse de sensibilité.

Enfin, on aurait pu s’attendre à ce que les taux d’actualisation aient plus d’importance, le dilemme propriétaire étant reconnu comme une véritable barrière à l’efficacité

40. plus le paramètre  $X$  est grand en valeur absolue, et plus  $Ef_{2050}$  est “sensible” à ce paramètre ; on retrouve bien que la courbe EC est la plus sensible aux variations du prix de l’énergie

	$R^2$	X1	stat $t$	X2	stat $t$
courbe AL	0,94	-919	-61	-4767	-310
courbe NL	0,88	-1158	-70	-3125	-184
courbe EC	0,96	-960	-68	-5053	-353
Toutes confondues	0,68	-1014	-44	-4360	-186

TABLE 15 – Résultats de la régression linéaire de  $Ef_{2050}$  en fonction de  $\tau_{reno,ini}$  et  $\tau_{croissance,ener}$

énergétique (LEVINSON and NIEMANN 2004 [41]) ; ainsi que des coûts des travaux de rénovation. Ceci est dû avant tout à la structure du modèle (taux d’actualisation finalement assez peu déterminants dans la procédure de choix, coûts intangibles “absorbant” les fluctuations des coûts de rénovation par la calibration à l’anne de base). On peut toutefois nuancer ces propos par le fait que ces problèmes restent mal connus et peu quantifiés.

Un autre aspect positif de cette analyse de sensibilité est la bonne retranscription de l’asymétrie des élasticités-prix retranscrite par Res-IRF.

Des pistes d’amélioration pourraient alors être envisagées suite à cette analyse de sensibilité : calibration moins “rigide” ainsi qu’une refonte de la procédure de rénovation donnant plus d’importance aux taux d’actualisation.

	2020	2050
BAU (ancien Res-IRF)	-7.1%	-13.2%
BAU (nouveau Res-IRF)	-16.7%	-45.7%
Mesures Grenelle + taxe (ancien Res-IRF)	-15.9%	-33.4%
Mesures Grenelle + taxe (nouveau Res-IRF)	-28.4%	-58.2%

TABLE 16 – Comparaison des prévisions de la baisse de la consommation d’énergie finale unitaire sur le parc existant entre Res-IRF ancienne et nouvelle version

## Troisième partie

# Analyse des résultats du modèle

## 10 Evaluation des politiques du Grenelle de l’environnement

La version précédente de Res-IRF était pessimiste quant à l’évolution de la consommation d’énergie dans le secteur résidentiel au regard des objectifs du Grenelle. Elle prédisait une réduction de 7.1% et 13.2% en 2020 et 2050 pour consommation d’énergie finale unitaire sur le parc existant, et 15.9% et 33.4% avec les mesures du Grenelle auxquelles on ajoutait la taxe carbone. On était donc très loin des objectifs de 38% en 2020 et 75% en 2050.

Depuis cette dernière étude, le modèle a évolué sur plusieurs points : ajout du bois énergie comme combustible et des logements sociaux comme type de décideur, mise à jour de certaines données (coûts de rénovation, taux de rénovation initial, état du parc initial). La quasi-totalité des changements apportés vont dans le sens d’une baisse de la consommation d’énergie dans le scénario au fil de l’eau : taux de rénovation passant de 1% à 3%, coûts de rénovation diminués, faible taux d’actualisation dans le logement social (dont la plupart étaient comptabilisés auparavant dans la catégorie propriétaires bailleurs en logement collectif, celle ayant le taux d’actualisation le plus élevé).

On a simulé à nouveau les différentes politiques pour apprécier l’étendue des changements. C’est sans grande surprise que les prévisions avec la nouvelle version sont beaucoup plus optimistes (voir tableau 16). Les figures 28 et 29 donnent les résultats de façon détaillés : pour différents scénarios (politiques isolés, scénarios Grenelle ou scénarios volontaristes), les consommations unitaires (par  $m^2$ ) ou totales, en énergie primaire ou finale, dans le neuf ou dans l’existant. On n’atteint toutefois pas les objectifs du Grenelle même en présence de taxe carbone. Si les résultats précédents étaient sans doute un peu pessimistes, ces derniers sont sûrement un peu optimistes pour le scénario BAU en particulier.

Au vu de l’analyse de sensibilité précédente, l’hypothèse la plus vraisemblable est que ce soit le changement du taux rénovation initial qui soit à l’origine de la majorité du changement. *Le scénario business as usual est beaucoup plus optimiste, mais les différentes politiques ont relativement moins d’impact.*

Cependant, au-delà de différences quantitatives, les aspects qualitatifs restent les mêmes :

- Contrairement aux autres politiques, la taxe carbone a un effet “bénéfique” sur la sobriété : on peut voir figure 29 que l’effet rebond est nettement moins important en présence de cette politique : par exemple l’ajout de la CCE aux mesures existantes du Grenelle font passer l’effet rebond de 29% à 14.6% en 2050

- La taxe carbone entraîne une substitution vers l’électricité et le bois-énergie (qui n’était pas présent dans l’ancien rapport) : la part de marché de l’électricité passe en effet de 19% en 2008 à 26% en 2050 (contre 24% scénario BAU) pour l’électricité et de 9% à 17% (contre 12% scénario BAU) pour le bois. L’explication de cette différence assez faible entre scénarios BAU et taxe carbone est double. D’une part, les part énergétiques dans la construction neuve ne changent (presque) pas, à cause des coûts intangibles et des faibles consommations dans le neuf donnant moins d’incitation à choisir l’énergie la moins chère. Ensuite dans l’existant le fuel switch ne concerne annuellement approximativement que 7% des logements gaz/fioul en BAU<sup>41</sup> (15% avec taxe<sup>42</sup>), *parmi ceux qui subissent une rénovation* (soit entre 2 et 3% du parc total). On peut également remarquer que l’effet rebond diminue les écarts de consommations totale entre énergies chères et bon marché (on consomme moins en énergie très taxée et plus en énergie moins taxée). Cependant il faudrait confirmer ces résultats avec la nouvelle procédure de fuel switch une fois que cette dernière sera bien intégrée au modèle (voir annexe partie 14).
- Les baisses de consommations sont plus fortes en énergie finale qu’en énergie primaire, du fait de la part croissante de l’électricité dans le mix énergétique.
- Les réductions unitaires sont plus importantes que les réductions globales à cause de la construction neuve (augmentation du nombre total de logement mais aussi de leur surface)

Enfin, on peut terminer par d’autres remarques :

- Les consommations dans le neuf ont (pour la majorité) un profil surprenant : augmentation sur le court terme mais diminution sur le long terme. Rappelons que le parc “neuf” est celui construit après 2007. Il compte en 380 000 logements en 2008 et 12.2 millions en 2050 (ce n’est donc que la comparaison en termes de consommations unitaires qui est appropriée). Sans coûts intangibles, le parc neuf initial serait moins performant thermiquement<sup>43</sup>. La calibration à l’année de base “favorise” les constructions BBC. Toute choses égales par ailleurs, la diminution des coûts intangibles fait donc diminuer le nombre de construction BBC. Mais la diminution simultanée des coûts de rénovations perturbe également la part des classes énergétiques dans la construction neuve. D’autre part, la hausse des prix de l’énergie favorise la sobriété des ménages et les constructions BBC. Avec tous ces effets combinés, on constate une augmentation de la consommation unitaire par rapport à l’année 2008 sur le court terme et une diminution sur le long terme.
- On peut constater un effet de saturation des économies d’énergie aux alentours de -75% (en énergie primaire) lorsqu’on met en place des politiques très ambitieuses (scénarios volontaristes). En effet, la réduction de la consommation est spectaculaire dans un premier temps (-50% en 2020) puis s’atténue, tandis que l’ajout de politiques encore plus ambitieuses (A+) n’améliore qu’à la marge les économies d’énergie. Les “derniers foyers de consommation” de Res-IRF sont alors composés du stock résiduel<sup>44</sup>, de logements existants en majorité de classe A et très sobre (mais qui consomment tout de même), et de bâtiments neufs RT05 contruits relativement tôt (il n’y a pas de rénovation du neuf dans Res-IRF).

41. De 3% en 2010 à 6% en 2050 pour les logements gaz et de 9% en 2010 à 15% en 2050 pour les logements fioul. Moins de 1% pour les logements élec et bois

42. De 6% en 2010 à 18% en 2050 pour les logements gaz et de 15% en 2010 à 33% en 2050 pour les logements fioul. Moins de 1% pour les logements élec et bois

43. Ceci est dû aux valeurs des paramètres du modèle

44. correspondant par exemple aux bâtiments historiques : le parc existant n’est pas entièrement rénovable dans Res-IRF

Gains effectifs d'énergie primaire par rapport à 2008							Gains d'énergie finale sur le parc total par rapport à 2008								
Objectifs de référence	Unitaires sur le parc		Unitaires sur le neuf		Unitaires sur le parc		Totaux sur le parc total		Unitaires effectifs		Totaux effectifs		Totaux théoriques		
	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	
	-38%	-75%													
Ref	Scénario de référence	-16,7%	-45,7%	9,2%	-6,3%	-19,8%	-45,7%	-8,7%	-24,8%	-23,1%	-51,5%	-12,4%	-32,8%	-21,9%	-48,9%
Politiques isolées															
CIDD	Crédit d'impôt DD	-19,2%	-47,1%	9,2%	-6,3%	-21,8%	-46,5%	-11,0%	-25,9%	-25,1%	-52,3%	-14,7%	-33,8%	-25,7%	-50,5%
EPTZ	Eco-prêt à taux zéro	-18,5%	-46,7%	9,2%	-6,3%	-21,3%	-46,3%	-10,3%	-25,6%	-24,5%	-52,1%	-14,1%	-33,6%	-24,7%	-50,1%
RT	Règlementation neuf 2012-2020	-16,7%	-45,7%	-28,8%	-7,7%	-23,6%	-61,6%	-13,0%	-46,7%	-25,8%	-63,3%	-15,5%	-49,2%	-24,0%	-59,1%
CCE	Taxe carbone	-22,9%	-55,8%	4,4%	-16,9%	-25,4%	-54,2%	-15,1%	-36,6%	-29,6%	-60,8%	-19,9%	-45,6%	-24,6%	-53,7%
OR	Obligation de rénovation	-17,4%	-50,0%	9,2%	-6,3%	-20,3%	-48,4%	-9,3%	-28,4%	-23,6%	-54,0%	-13,0%	-36,3%	-23,5%	-55,0%
Scénarios Grenelle															
AME	CIDD+EcoPTZ+RT	-21,5%	-48,3%	-28,8%	-7,7%	-27,6%	-63,2%	-17,5%	-49,0%	-29,7%	-64,8%	-19,9%	-51,2%	-31,2%	-62,1%
AMSI1	AME+CCE	-28,4%	-58,2%	-32,4%	-8,0%	-33,7%	-69,8%	-24,4%	-58,2%	-36,6%	-72,2%	-27,7%	-61,5%	-34,9%	-66,4%
AMSI2	AME+OR	-22,1%	-52,0%	-28,8%	-7,7%	-28,0%	-65,4%	-18,1%	-52,1%	-30,1%	-66,9%	-20,5%	-54,1%	-32,6%	-67,4%
AMSI3	AME+CCE+OR	-29,0%	-61,0%	-32,4%	-8,0%	-34,1%	-71,5%	-25,0%	-60,6%	-37,0%	-73,7%	-28,3%	-63,5%	-36,3%	-70,6%
Scénarios volontaristes															
A	AMSI3 avec CCE ambitieuse	-50,2%	-75,2%	-44,8%	-86,0%	-53,1%	-81,7%	-46,5%	-74,6%	-57,7%	-83,8%	-51,8%	-77,5%	-52,8%	-76,7%
A+	Avec CIDD et EPTZ ambitieux	-50,2%	-76,9%	-44,8%	-86,0%	-53,1%	-82,7%	-46,5%	-76,0%	-57,7%	-84,6%	-51,8%	-78,7%	-52,8%	-78,5%
A++	A+ avec OR ambitieux	-50,2%	-77,7%	-44,8%	-86,0%	-53,1%	-83,1%	-46,5%	-76,6%	-57,7%	-85,0%	-51,8%	-79,3%	-52,8%	-79,7%

FIGURE 28 – Consommations d'énergie sous différentes politiques

Progression des parts énergétiques dans la consommation finale										Emissions directes de CO2 par rapport à 2008		Effet rebond absolu		
Objectifs de référence	Ref	Electricité (part 2008: 17%)		Gaz naturel (part 2008: 53%)		Fioul (part 2008: 21%)		Bois (part 2008: 9%)		2020	2050	2020	2050	
		2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050					
-75%														
Politiques isolées	Scenario de référence	18,0%	24,0%	50,8%	47,9%	20,3%	15,6%	10,9%	12,5%	-14,9%	-37,4%	12,1%	31,4%	
	CIDD	Crédit d'impôt DD	18,1%	24,0%	50,9%	47,9%	20,3%	15,6%	10,8%	12,3%	-17,0%	-38,2%	14,9%	33,6%
	EPTZ	Eco-prêt à taux zéro	18,0%	24,0%	50,9%	47,9%	20,3%	15,7%	10,8%	12,4%	-16,4%	-38,0%	14,1%	33,0%
	RT	Règlementation neuf 2012-2020	17,0%	18,4%	51,3%	51,3%	20,9%	19,2%	10,8%	11,1%	-17,5%	-50,9%	11,2%	24,3%
	CCE	Taxe carbone	19,3%	27,7%	49,3%	42,3%	18,8%	12,6%	12,5%	17,2%	-24,0%	-52,8%	6,3%	17,3%
OR	Obligation de rénovation	18,0%	24,3%	50,9%	48,2%	20,3%	15,2%	10,8%	12,3%	-15,4%	-40,6%	13,7%	41,8%	
Scénarios Grenelle														
AME	CIDD+EcoPTZ+RT	17,0%	18,2%	51,5%	51,3%	21,0%	19,6%	10,5%	10,7%	-21,5%	-52,5%	16,4%	29,0%	
AMS1	AME+CCE	18,2%	21,2%	50,1%	47,1%	19,8%	17,3%	11,8%	14,4%	-30,6%	-64,5%	11,0%	14,6%	
AMS2	AME+OR	17,0%	18,1%	51,7%	51,8%	20,9%	19,7%	10,4%	10,3%	-22,0%	-55,2%	18,1%	40,7%	
AMS3	AME+CCE+OR	18,2%	21,1%	50,3%	47,8%	19,7%	17,2%	11,7%	13,9%	-31,1%	-66,2%	12,7%	24,2%	
Scénarios volontaristes														
A	AMS3 avec CCE ambitieuse	23,2%	24,7%	41,6%	35,9%	14,9%	11,7%	20,3%	27,7%	-59,0%	-82,9%	2,4%	-3,4%	
A+	A avec CIDD et EPTZ ambitieux	23,2%	24,7%	41,6%	37,9%	14,9%	12,4%	20,3%	25,1%	-59,0%	-83,2%	2,4%	-1,2%	
A++	A+ avec OR ambitieux	23,2%	24,6%	41,6%	38,0%	14,9%	12,4%	20,3%	25,1%	-59,0%	-83,6%	2,4%	2,2%	

FIGURE 29 – Consommations d'énergie sous différentes politiques. Résultats supplémentaires

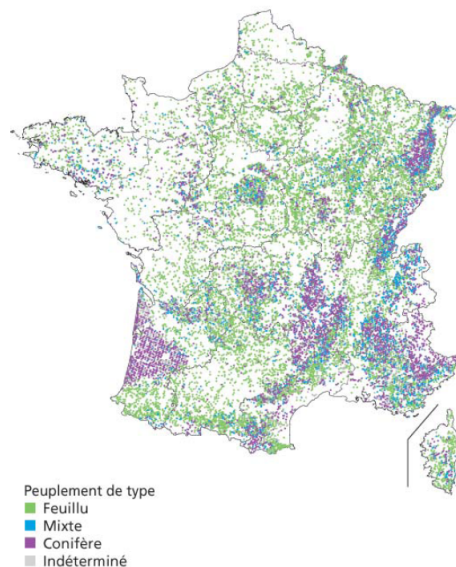


FIGURE 30 – Composition de la forêt française (source IFN [31])

## 11 Le bois-énergie : solution d’avenir pour la consommation d’énergie dans le résidentiel <sup>45</sup> ?

### 11.1 La forêt française : un potentiel important encore peu exploité

La forêt française occupe à l’heure actuelle environ 15.5 millions d’hectares, soit un peu plus d’un quart du territoire métropolitain. La France possède la quatrième plus grande forêt d’Europe, derrière la Suède, la Finlande et l’Espagne. Au plus bas au milieu du XIXème siècle (9.5 Mha), la surface forestière n’a depuis cessé d’augmenter. Cette augmentation a été particulièrement forte pendant les trentes glorieuses, avec la mise en place du Fonds Forestier National visant à soutenir la production.

Malgré ce potentiel, la France est en déficit commercial dans ce secteur (qui est passé de 2 milliards d’euros par an en 1996 aux alentours de 6 milliards d’euros par an en 2007), qui représente après le pétrole le deuxième poste du solde négatif du commerce extérieur (Rapport PUECH 2009 [53]).

Plusieurs raisons expliquent la sous-exploitation de la forêt française.

Tout d’abord les trois quarts de la forêt française sont privés. Cette forêt privée a une structure foncière extrêmement morcelée : 20% de sa surface est composée de parcelles faisant moins de quatre hectares (taille souvent considérée comme la taille en dessous de laquelle une parcelle ne peut pas être rentable), et détenue par plus de trois millions de propriétaires (les 80% de la surface restante étant détenus par moins de 500 000 propriétaires). La majorité de ces propriétaires préfèrent le payer le “prix de la tranquillité” plutôt que d’exploiter leur parcelle, qui est souvent vue comme un patrimoine à préserver

45. Parmi les nouveaux ajouts au modèle (logements sociaux et bois), c’est surtout le deuxième qui a été étudié, comme on peut le voir à la fin de cette partie. L’impact de politiques spécifiquement tournées vers le logement social (éco-prêt logement social, programmes de rénovation) pourront faire l’objet de travaux ultérieurs.

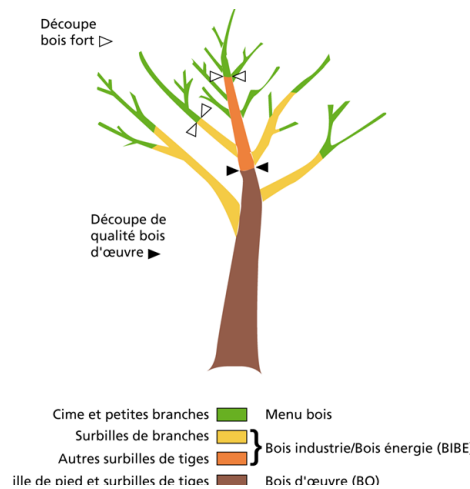


FIGURE 31 – Illustration du lien entre BIBE et BO (source IFN)

plus qu'une source de revenus.

D'autre part, la diversité des essences (plus d'une vingtaine, dont 41% de chênes et 37% de résineux) est un atout écologique mais un handicap pour la récolte de bois, notamment par rapport aux forêts quasiment monospécifiques des pays scandinaves : cela conduit à des tailles de scieries plus petites et donc moins de productivité. La difficulté d'exploitation de certaines parcelles, à cause de la pente, ou de la difficulté d'accès, rendent non rentables au prix du bois actuel de grandes surfaces forestières.

Par ailleurs, le bois est un produit complexe. Les parties principales d'un arbre sont utilisées pour faire du bois d'œuvre (BO, pour faire des planches notamment), tandis que les extrémités sont valorisées sous forme de bois industrie bois énergie (BIBE) (voir figure 31). Le BO est nettement plus rentable que le BIBE (certains produits issus de la filière bois ont une très forte valeur ajoutée, notamment les planches servant à la fabrication de barriques pour le secteur viticole), reléguant pour certains ce dernier au rang de "sous-produit". On estime à 42% environ la part du BIBE lié physiquement au BO. Par conséquent le développement du BIBE ne peut s'envisager qu'en soutenant le BO, notamment dans la construction.

Enfin, la filière bois en France est mal structurée : multiplicité d'acteurs mal coordonnés, petites exploitations... expliquent le manque d'efficacité et les difficultés d'adaptation aux fluctuations du marché du secteur.

Ainsi, pour une croissance annuelle biologique estimée à 100 millions de m<sup>3</sup>, la récolte est d'environ 58 millions de m<sup>3</sup>, se répartissant entre 20 millions de bois de feu, bois autoconsommé par des particuliers en dehors des circuits commerciaux (ce qui rend difficile son estimation), 12 millions de m<sup>3</sup> de bois industrie (essentiellement du bois de trituration servant à la fabrication de pâte à papier), 3 millions de m<sup>3</sup> de bois énergie, et 23 millions de m<sup>3</sup> de bois d'œuvre.

## 11.2 Objectifs de développement de la filière

La France s'est fixé l'objectif, originaire des "trois fois vingt" du paquet énergie climat de l'Union Européenne, de faire passer la part des énergies renouvelables à 23% de la consommation d'énergie finale en 2020. La filière bois apparaît dès lors comme un levier



indispensable pour atteindre cette cible ambitieuse, au travers principalement de trois politiques : les plans bois-énergie national de l'ADEME, le Fonds Chaleur et les appels d'offre de la Commission de Régulation de l'Energie (CRE).

Le plan bois-énergie national a pour objectif de développer les chaufferies au bois dans les secteurs domestiques, tertiaires et industriels. Le plan 2007-2010 a dans ses objectifs d'augmenter de 80 000 tep/an la consommation de BIBE pour un budget annuel de 30M€.

Le Fonds Chaleur mis en place suite au Grenelle de l'Environnement prend la forme d'un triple appel d'offre (2009, 2010, 2011, pour un montant total d'un milliard d'euros), concernant les énergies renouvelables et les énergies de récupération : cogénération, récupération de la chaleur des eaux usées.

Les appels d'offre de la CRE ont pour but de produire plus d'électricité à partir des énergie renouvelables, et notamment la biomasse.

Si on cumule les objectifs des différentes politiques sur la période 2007-2011, ce sont environ 5 millions de m<sup>3</sup> supplémentaires qui sont visés.

Ces politiques d'augmentation de la récolte soulèvent la question de l'évaluation des volumes de bois mobilisables sur le territoire français. En effet, l'objectif de ces politiques n'est pas de creuser encore plus le déficit commercial français dans le secteur forestier mais au contraire de développer cette filière (ce qui nécessite de mieux la structurer).

Un rapport assez complet (ADEME 2007 [2]), prenant en compte à la fois des facteurs biologiques, mais aussi des facteurs technico-économiques et institutionnels (toutes les "barrières à l'exploitation" évoquées plus haut) estimait à 12 millions de m<sup>3</sup> supplémentaires les ressources en BIBE, auxquels on peut ajouter 8 Mm<sup>3</sup> de menus bois (MB). Une actualisation faite par le CEMAGREF et l'IFN ([13]) ont conduit à une réévaluation de ces deux estimations à 30 Mm<sup>3</sup> et 12Mm<sup>3</sup>. Les ressources seraient donc dans un premier temps suffisantes pour atteindre les objectifs.

### 11.3 Freins au développement du bois-énergie à grande échelle

Au delà des enjeux déjà très complexes et enchevêtrés d'économie d'énergie, d'indépendance énergétique et de réduction des gaz à effet de serre, le développement à plus grande échelle de la filière bois énergie est également lié aux problématiques de biodiversité, de politique agricole et de santé publique.

La forêt a la particularité d'être un espace multifonctionnel : la production de bois n'est qu'une de ses fonctions aux côtés de la préservation de la biodiversité, des services récréatifs, de la séquestration du carbone, ou encore de la filtration des eaux de pluie. La mise en avant d'une ces fonctions peut donc entraîner une perte pour les autres.

Une exploitation trop intensive de la forêt peut entrer en conflit avec les usagers s'en servant comme espace de loisir ou avec les acteurs impliqués dans la préservation des paysages.

Une forêt monospécifique et relativement jeune est plus favorable à la collecte du bois, tandis que la biodiversité est plus grande dans les forêts à plusieurs essences<sup>46</sup> mais aussi plus vieilles. La plus grande fragilité des forêts monospécifiques aux grandes tempêtes (comme Loktar et Martin en 1999 et Klaus en 2008), qui pourraient de surcroît s'accroître suite au changement climatique incite à prendre cet aspect en compte dans la gestion des exploitations sylvicoles<sup>47</sup>.

46. Plus d'essences signifie plus de biodiversité, mais aussi un écosystème plus riche qui enduit encore plus de biodiversité (davantage d'insectes, de champignons etc)

47. De façon assez ironique, certains exploitants ont reconverti leurs forêts en champs de panneaux solaires suite à la tempête Klaus

Ensuite, en termes de politique climatique, deux options divergent : laisser croître les forêts pour qu'elles séquestrent du carbone ou développer la production pour que le bois-énergie se substitue aux énergies fossiles. La stratégie optimale de combinaison de ces options fait l'objet de débats dans la littérature (LECOCQ 2011 [40]). Il est également utile de rappeler que le bilan carbone du bois énergie n'est nul que si l'équilibre croissance du stock/production de bois est respecté, ce qui peut être mis en cause si les récoltes sont trop importantes (DEHEZA et BELLASSEN 2010 [21]). Le développement du bois comme matériau de construction doit aller de pair avec le développement du bois énergie, non seulement parce qu'ils sont liés de façon technico-économique, mais aussi parce que la substitution par le bois de matériaux de construction dont la fabrication est coûteuse en énergie et fortement émettrice est un important gisement de carbone et d'économie d'énergie.

Le développement du ramassage des menus bois, jusqu'ici laissés sur place, pour alimenter la filière BIBE pose également la question de l'appauvrissement des sols en minéraux et en matière organique, remettant en cause la viabilité de la forêt à long terme.

D'autre part, le bois énergie pourrait présenter les mêmes controverses que les agrocarburants avec le développement de taillis à courtes voire à très courtes rotations. De nouvelles problématiques pour cette filière mais bien connus pour les agrocarburants apparaîtraient alors, comme la tension sur les ressources en eau ou la pollution diffuse à cause des différents intrants, ainsi que la concurrence avec les surfaces agricoles, entraînant une appréciation et une augmentation de la volatilité des matières premières agricoles (AUROY *et al.* 2011).

Enfin, au niveau des particuliers, l'introduction dans le mix énergétique du bois-énergie est efficace avec des appareils modernes telles que la chaudière à flamme inversée (rendement de 90%), mais peut s'avérer désastreux avec des cheminées à foyer ouvert (rendement de l'ordre de 10%). Le rejet de composés organiques volatils suite à la combustion, dont on perçoit des pics lors des vagues de froid, peut poser des problèmes de santé publique dans des zones densément peuplées. Les filtres installés sur les appareils modernes permettent de contrôler ce risque. Ces deux derniers enjeux ont été pris à bras le corps et sont en voie de règlement avec le développement du label flamme verte, favorisant l'achat d'appareils modernes et efficaces, ainsi que la mise en place de normes très strictes pour les chaufferies au bois de grande taille.

L'ensemble des points soulevés ici fait bien apparaître que le développement du bois-énergie à grande échelle n'est pas sans danger. Cependant, le développement de la filière par rapport à son niveau actuel fait l'objet d'un consensus politique fort, et les marges de manoeuvres restent encore importantes.

## 11.4 Bois-énergie dans Res-IRF

L'introduction du bois-énergie dans Res-IRF s'est faite en tant que quatrième possibilité d'énergie de chauffage aux côtés de l'électricité, du gaz et du fioul. Les valeurs numériques des paramètres nécessaires à cet ajout sont détaillés en annexe partie 12.4.

Une telle représentation présente certaines limitations pour ce type d'énergie qui présente beaucoup de spécificités.

- Tout d'abord, le bois a la particularité d'être utilisé de façon non négligeable en *chauffage d'appoint*. Or la représentation du parc de Res-IRF ne permet qu'une seule énergie de chauffage par bâtiment. Les logements chauffés au bois dans Res-IRF sont ceux dont le bois est *l'énergie de chauffage de base*. La consommation de bois reconstituée dans Res-IRF (dépendant notamment de la performance énergétique des logements chauffés au bois) en 2008 correspond alors à une consommation

de 30 TWh soit 11,5 Mm3 ou encore 2,5 Mtep (9% de la consommation totale d'énergie de chauffage dans le résidentiel). On est donc loin des 7 Mtep estimés de consommation de bois dans le résidentiel<sup>48</sup>. La différence représentant environ 20 Mm3 représente le chauffage d'appoint, pouvant provenir du bois de feu (bois consommé hors des circuits commerciaux), estimé entre 20 et 25 Mm3, mais pas seulement<sup>49</sup> (par exemple poêle à bois moderne utilisant des plaquettes forestières).

- Les logements utilisant le bois comme chauffage de base peuvent être des vieilles maisons utilisant des cheminées à foyer ouvert comme des maisons neuves et bien isolés utilisant une chaudière à bois ultra-moderne. Le manque de données sur le parc de logements chauffés au bois a conduit à prendre des hypothèses ad hoc pour sa constitution (voir partie 12.1.3 en annexe). Cette diversité complique également le choix des coûts de fuel switch en présence de technologies implicites.
- Res-IRF ne prend pas en compte le chauffage urbain, et ne modélise pas non plus le mix énergétique dans le secteur électrique (le nouveau nexus électrique d'Imaclim-R est en cours de développement). Sachant que les projets de valorisation de la filière bois passent beaucoup par les chaufferies collectives et les petites centrales à cogénération (cf partie 11.2) , c'est tout un pan de développement de la filière qui n'est pas pris en compte.
- Le prix du bois est très variable d'une région à l'autre, et même au sein d'une région (différence entre ville et campagne notamment), le coût de transport représentant environ 10% du prix final. D'autre part, la capacité calorifique du bois est très variable selon les essences et le pourcentage d'humidité des produits bois. Une étude (ADEME 2010 [4]) dresse un panorama des prix du combustible bois en €/kWh PCI (qui l'unité appropriée pour Res-IRF). Les prix varient fortement selon le produit bois, allant de 2 à 3 centimes d'euros par kWh pour les bûches jusqu'à 8 centimes d'euros par kWh pour les plaquettes forestières. De plus le bois circulant hors des circuits commerciaux représente en fait la majorité de la consommation de bois énergie (20 millions de m3 sur 30, ADEME 2009 [2]), mais on peut faire l'hypothèse qu'il concerne essentiellement le chauffage d'appoint non pris en compte dans Res-IRF. Le modèle Res-IRF ne permettant pas de prendre en compte ces différents produits bois, on a pris le prix du bois à l'année de base à 4 centimes d'euros par kWh.

## 11.5 Endogénéisation de l'offre de bois

Le bois-énergie est un marché plutôt petit (national), contrairement au marché d'autres catégories de bois à forte valeur ajoutée et à celui des énergies fossiles et à d'autres catégories de bois à forte valeur ajoutée. Par conséquent, une hausse significative de la consommation de bois entraînerait une augmentation du prix de ce dernier.

Dans le scénario de base (c'est-à-dire pour toutes les simulations sauf celle dans cette partie), le prix du bois évolue de façon exogène, comme les autres énergies (1% d'augmentation par an dans le scénario de référence).

On a développé dans Res-IRF une option alternative permettant au prix d'évoluer de façon endogène, par l'intermédiaire d'une fonction d'offre, la consommation de bois énergie à l'année  $i$  déterminant son prix à l'année  $i+1$ . Cette endogénéisation a pour but d'augmenter le prix du bois si sa consommation augmente, limitant par exemple le

48. 6,9 pour ADEME chiffres clés du bâtiment 2007 p41, 7,6 pour CLIP n° 20 p27

49. C'est pourquoi la distinction bois de feu/bois commercial indispensable dans les modèles d'économie forestière n'est pas pertinente dans Res-IRF, sauf pour la détermination du prix du bois par offre endogène.

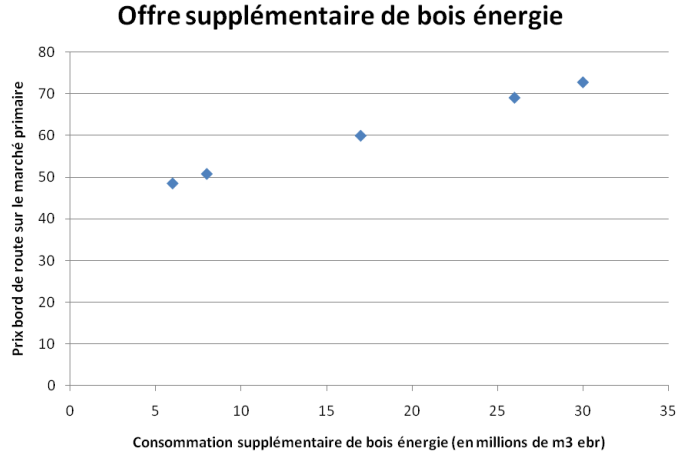


FIGURE 32 – Courbe d’offre du prix du bois établie en forçant le modèle FFSM du LEF

fuel switch dans le cas de l’introduction d’une taxe carbone. Un tel bouclage pourrait également être réalisé pour les autres énergies avec le couplage avec IMACLIM-R.

Ce travail n’aurait pas été possible sans l’aide du Laboratoire d’Economie Forestière par l’intermédiaire de S. CAURLA et de leur modèle French Forest Sector Model (CAURLA 2010 [12]). La courbe d’offre a été réalisée en forçant le modèle FFSM par l’ajout d’une consommation additionnelle en calculant les nouveaux prix du bois (voir figure 32).

Cette courbe d’offre est linéaire. En faisant une régression, on obtient que l’augmentation du prix du bois bord de route est de 2.3% par million de  $m^3$  supplémentaire de BIBE consommé.

Enfin, la part du transport est d’environ 10% dans le prix du bois livré (ADEME), qui est donc la part fixe du prix du bois (on pourrait l’indexer sur le prix du fioul mais la sophistication est certainement excessive).

On retient finalement la fonction d’offre suivante :

$$prix_{bois,i+1} = 0.1 \times prix_{bois-réf} + 0.9 \times prix_{bois-réf} \left( 1 + (conso_i - conso_{réf}) \frac{conso_{résid}}{conso_{réf}} \times 2.3\% \right)$$

avec  $conso_i$  en millions de  $m^3$ ,  $conso_{réf} = 11.55$ ,  $conso_{résid} = 30$  et  $preis_{bois-réf}$  le prix du bois dans le cas du scénario exogène (4c€ au départ puis augmente de 1% par an).

On introduit ici un coefficient d’ajustement  $\frac{conso_{résid}}{conso_{réf}}$  pour prendre en compte le fait que Res-IRF ne couvre qu’une partie de la consommation de bois énergie (environ 12 millions de  $m^3$  à l’année de base, alors qu’elle est estimée à 30 millions de  $m^3$  dans le secteur résidentiel) alors qu’elle est entièrement prise en compte dans FFSM.

## 11.6 Consommation de bois selon différents scénarios

La figure 33 donne la consommation de bois selon différents scénarios (lorsque le prix du bois est endogène ou exogène, et en présence de taxe carbone plus ou moins élevée, Taxe 50 signifiant que la valeur de la taxe vaut 50€/tCO<sub>2</sub> à l’année de base).

Quatre raisons peuvent expliquer une diminution de la consommation de bois :

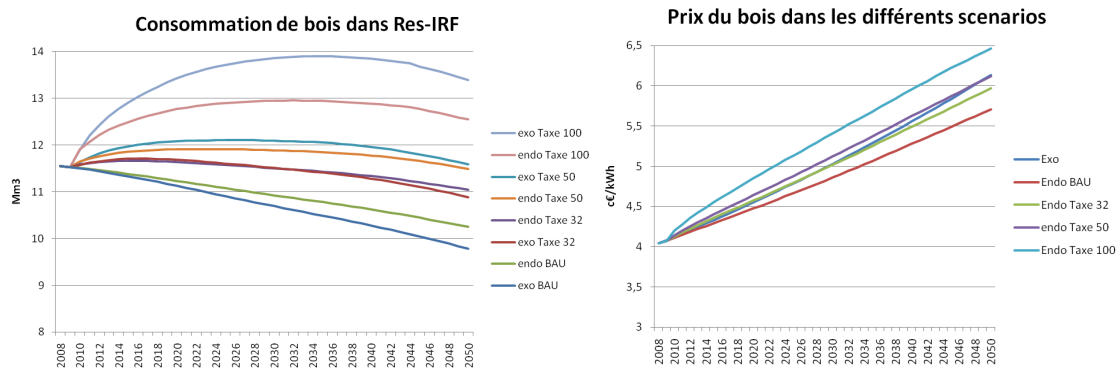


FIGURE 33 – Consommation de bois simulée dans Res-IRF et prix du bois en fonction de différents scenarios

- La démolition de logements anciens qui se chauffaient au bois (qui sont souvent très énergivores).
- La rénovation de logements anciens qui se chauffaient au bois.
- Une plus grande sobriété dans les logements chauffés au bois (entraînée par la hausse du prix du bois).
- Les logements anciens chauffés au bois qui après rénovation passent à l’électricité, au gaz ou au fioul.

Tandis que pour l’augmentation de la consommation de bois, trois possibilités existent :

- Des logements anciens chauffés à l’électricité, au gaz ou au fioul qui après rénovation se mettent à se chauffer au bois.
- La construction de logements neufs avec le bois comme énergie de chauffage
- Un relâchement de la sobriété (à cause d’une baisse du prix du bois<sup>50</sup>)

Dans le scenario BAU, la diminution de la consommation de bois due à l’augmentation de l’efficacité est plus importante que l’augmentation due au “solde de fuel switch” auquel s’ajoutent les logements neufs (qui sont généralement assez efficaces). Par conséquent la consommation de bois énergie diminue.

Une taxe carbone laisse le prix du bois inchangé (il n’est pas taxé car son contenu carbone est considéré comme nul) mais renchérit le prix des autres énergies. Son effet principal va être d’augmenter le nombre de fuelswitch en direction du bois et d’augmenter la part de logements chauffés au bois dans la construction neuve. Un autre effet négligeable à court terme mais pas à long terme contrebalance cette augmentation. Le surcroît de rénovation dans les logements hors bois fait baisser les coûts de rénovation et les coûts intangibles (par apprentissage) et ainsi augmente les rénovations dans les logements bois, qui sont alors plus efficaces et consomment moins. Au final, même si la part du bois progresse dans le mix énergétique, l’augmentation de l’efficacité des bâtiments fait qu’au bout d’un moment la consommation cesse d’augmenter.

L’endogénéisation du prix du bois fait augmenter (respectivement baisser) le prix du bois lorsque la consommation est inférieure (respectivement supérieure) à la consommation la première année. Comme toutes choses égales par ailleurs, un prix plus élevé fait diminuer la consommation totale de bois (de façon intuitive mais par beaucoup de leviers différents : sobriété, augmentation du nombre de rénovation et du “solde de fuelswitch” vers le bois), cette endogénéisation du prix du bois agit donc comme une “force de rappel”

50. en réalité dans ces simulations le prix du bois augmente toujours comme on peut le voir sur la figure

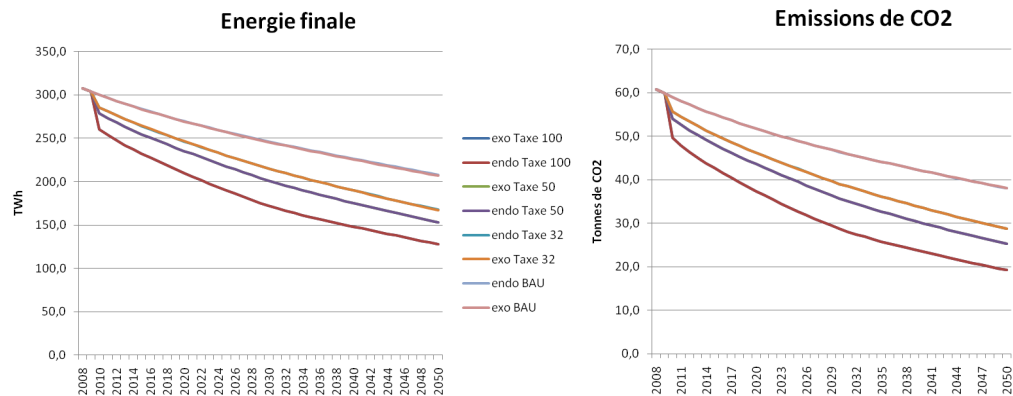


FIGURE 34 – Consommations d'énergie et émissions de CO2 selon les différents scenarios

de la consommation à l'année  $i$  vers la consommation à l'année de base.

Mais comme on peut le voir figure 34, l'endogénéisation du prix du bois n'a pas d'impact sur la consommation totale et les émissions de CO2 (la différence de bois consommée est d'au maximum 1 millions de m2, ce qui n'est pas beaucoup au regard de la consommation d'énergie dans tout le secteur résidentiel, et de fait les courbes endo et exo sont confondues).

Dans tous les cas, on voit qu'une taxe carbone augmente la consommation de bois dans des proportions raisonnables, l'augmentation de l'efficacité du parc contrebalançant les fuel switch vers cette énergie.

# Conclusion

C'est avec légitimité que les décideurs politiques attendent des modèles qu'ils soient passés au crible d'une évaluation rigoureuse, permettant de valider leurs résultats. La validation de modèles, d'autant plus lorsqu'ils représentent des phénomènes socio-économiques, se heurte en réalité à une impossibilité épistémologique (ORESQUES 1994 [50]). Dans la pratique, la plupart des scientifiques reconnaissent les faiblesses de leur modèle, attitude qui tranche avec la tonalité très affirmative entourant la divulgation de leurs résultats dans la sphère publique (ORESQUES 1994 [50]). Cependant, dans la plupart des cas, les incertitudes font l'objet d'un traitement à la marge, et peu de modélisateurs prennent le temps de décortiquer et d'explicitier les différentes sources d'incertitudes de leur modèle (VAN ASSELT et ROTMAN 2002 [7]). Les outils existants ne permettent de traiter de façon satisfaisante qu'un certain type d'incertitude (les incertitudes empiriques, pour reprendre la taxonomie de Oresques).

La méthode originale d'analyse de sensibilité que l'on a développé dans ce mémoire est de ce type. Cette dernière a permis de mesurer l'impact des différents paramètres sur les résultats du modèle et nous avons ainsi pu déterminer quels étaient ses paramètres saillants : prix de l'énergie, courbe d'utilisation et taux de rénovation initial. Nous avons essayé de dépasser cette première analyse en mettant en lumière les difficultés propres à ce type de modèle (calibrages), pour pouvoir suggérer des pistes d'améliorations (lien entre la qualité et la quantité des rénovations, coûts intangibles).

Beaucoup d'autres aspects pourraient également être développés : meilleure connaissance technologique (pour déterminer les coûts de rénovation et le taux de rénovation), segmentation par classes de revenus pour pouvoir traiter de problèmes de précarité énergétique, modélisation du secteur de la rénovation, paramètres comportementaux plus finement reproduits, modélisation du chauffage urbain et du mix énergétique de la production électrique.

Au final, quel crédit accorder aux résultats du modèle ? Les récents développements, même s'ils donnent des résultats quantitativement différents, ne font que confirmer les tendances évoquées dans les travaux précédents : les politiques promouvant l'efficacité énergétique permettent des réductions significatives de consommations d'énergie par rapport au scénario au fil de l'eau, mais ne permettent pas d'atteindre les objectifs du Grenelle, même lorsqu'elles sont ambitieuses.

Au-delà de prévisions quantitatives, c'est davantage sur la compréhension de différents mécanismes liés à l'efficacité énergétique que ces modèles de prospectives permettent d'avoir des éclairages : *"models are useful, not because they predict, but because building them and using them improve our insights"* (BANKES 1993 [9]).

## Références

- [1] ADEME : 2008, ‘Chiffres clés du bâtiment’. Technical report, ADEME.
- [2] ADEME : 2009a, ‘Biomasse forestière, bocagère et populicole à l’horizon 2020’. Technical report, ADEME.
- [3] ADEME : 2009b, ‘Evaluation prospective du marché du chauffage domestique au bois et autres biomasse en 2020’. Technical report, ADEME.
- [4] ADEME : 2010, ‘Enquête sur le prix des combustibles bois en 2008 et 2009’. Technical report, ADEME.
- [5] Alcott, H. and S. Mullainathan : 2010, ‘Behaviour and Energy Policy’. *Science* **327**, 1204–1205.
- [6] Allibe, B. : 2009, ‘Impact of comfort level on French dwelling space heating energy demand : a retrospective and prospective study’. In : *Behavior, Energy and Climate Change Conference*.
- [7] Asselt, M. B. A. V. and J. Rotmans : 2002, ‘Uncertainty in Integrated Assessment Modelling’. *Climatic Change* **54**, 75–105.
- [8] Auroy, R., B. Boutefeu, N. Richez, and D. Samri : 2011, ‘Le développement du bois énergie : solution durable pour répondre au défi énergétique?’. Technical report, Ecole des Ponts et Chaussées - Master d’Action Publique.
- [9] Bankes, S. : 1993, ‘Exploratory modeling for policy analysis’. *Operations Research* **41** (3), 435–449.
- [10] Beugin, D. and M. Jaccard : 2011, ‘Statistical simulation to estimate uncertain behavioral parameters of hybrid energy-economy models’. *Environmental Modeling and Assessment* **16** (4).
- [11] Bovay, C. : 1987, *L’énergie au quotidien*. Genève.
- [12] Caurla, S., F. Lecocq, and P. Delacote : 2010, ‘The French Forest Sector Model version 1.0 Presentation and theoretical foundations’. *Cahier du LEF* **2010-03**.
- [13] CEMAGREF-IFN : 2008, ‘Évaluation des volumes de bois mobilisables à partir des données de l’IFN "nouvelle méthode" Actualisation 2009 de l’étude "biomasse disponible" de 2007’. Technical report.
- [14] CEREN : 2010, ‘Suivi du Parc et des Consommations d’Energie. Parc en 2009’. Technical report.
- [15] CGDD : 2009, ‘La mobilité résidentielle progresse dans le parc locatif privé et diminue dans le parc social’. Technical report, CGDD.
- [16] CLIP : 2010, ‘Habitat facteur 4’. Technical report, CLIP.
- [17] Convery, F. J. : 2011, ‘Reflections. Energy Efficiency Literature for Those in the Policy Process’. *Review of Environmental Economics and Policy*.
- [18] Crassous, R., J.-C. Hourcade, and O. Sassi : 2006, ‘Endogenous Structural Change and Climate Targets Modeling Experiments with Imaclim-R’. *The Energy Journal Special Issue : Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation*, 259–276.
- [19] de Marchi, B. : 1995, ‘Uncertainty in Environmental Emergencies : a diagnostic tool’. *Journal of Contingencies and Crisis Management* **3** (2), 103–112.
- [20] de Quero, A. and N. Lapostolet : 2009, ‘Plan Bâtiment Grenelle Rapport sur la précarité énergétique’. Technical report, ANAH.



- [21] Deheza, M. and V. Bellassen : 2010, 'Valorisation carbone de la filière forêt-bois en France'. Technical report, CDC Climat.
- [22] Desjeux, D. : 1996, *Anthropologie de l'électricité. Les objets électriques dans la vie quotidienne en France*. Paris.
- [23] Farsi, M. : 2010, 'Risk aversion and willingness to pay for energy efficient systems in rental apartments'. *Energy Policy* **38**, 3078–3088.
- [24] Gillingham, K., K. Newell, and W. Pizer : 2008, 'Modeling endogenous technological change for climate policy analysis'. *Energy Economics* **30(6)**, 2734–2753.
- [25] Giraudet, L., C. Guivarch, and P. Quirion : 2011a, 'Evaluation des mesures du Grenelle de l'environnement sur le parc de logements français'. Technical report, Energy Economics doi : 10.1016/j.eneco.2011.07.010.
- [26] Giraudet, L., C. Guivarch, and P. Quirion : 2011b, 'Comparing and combining energy saving policies : will proposed residential sector policies meet French official targets?'. *The Energy Journal Special Issue. Strategies for mitigating climate change through energy efficiency : a multi-model perspective*, doi : 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol32-SI1-11.
- [27] Haas, R., H. Auer, and P. Biermayr : 1998, 'The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating'. *Energy and Buildings* **27(2)**, 109–205.
- [28] Haas, R. and L. Schipper : 1998, 'Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements'. *Energy Economics* **20(4)**, 421–442.
- [29] Hitchings, R. : 2008, 'Air conditioning and the material culture of routine human encasement'. *Journal of Material Culture*.
- [30] Hourcade, J.-C., M. Jaccard, C. Bataille, and F. Gherzi : 2006, 'Hybrid Modeling : new answers to old challenges'. *The Energy Journal Special issue 2 : Hybrid Modeling of Energy Environment Policies*, 1–12.
- [31] IFN : 2008, 'La forêt en chiffres et en cartes'. Technical report, IFN.
- [32] INSEE : 2008, 'Comptes du logement'. Technical report, INSEE.
- [33] Isaac, M. and D. P. van Vuuren : 2009, 'Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change'. *Energy Policy* **37**, 507–521.
- [34] Jaccard, M. and M. Dennis : 2006, 'Estimating home energy decision parameters for a hybrid energy-economy policy model'. *Environmental Modeling and Assessment* **11(2)**, 91–100.
- [35] Jaffe, A. and R. Stavins : 1994a, 'Energy-efficiency investments and public policy'. *The Energy Journal* **15(2)**, 43–65.
- [36] Jaffe, A. and R. Stavins : 1994b, 'The energy-efficiency gap : what does it mean?'. *Energy Policy* **22(10)**, 804–810.
- [37] Kempton, W. and L. Montgomery : 1982, 'Folk quantification of energy'. *Energy* **7(10)**, 817–827.
- [38] Koomey, J. G. : 2002, 'FROM MY PERSPECTIVE. Avoidint "The Big Mistake" in forecasting technology adoption'. *Technological Forecasting & Social Change* **69**, 511–518.
- [39] Lagandré, E. : 2006, 'L'amélioration énergétique des logements existants. Le rôle des artisans dans l'information de leurs clients'. *Les Annales de la Recherche Urbaine* **n°103**, pp95–99.

- [40] Lecocq, F., S. Cauria, P. Delacote, A. Barkaoui, and A. Sauquet : 2011, 'Paying for forest carbon or stimulating fuelwood demand? Insights from the French Forest Sector Model'. *Journal of Forest Economics* **17**, 157–168.
- [41] Levinson, A. and S. Niemann : 2004, 'Energy use by apartment tenants when landlords pay for utilities'. *Resource and Energy Economics* **26**(1), 51–75.
- [42] Linares, P. and X. Labandeira : 2010, 'Energy efficiency : Economics and policy'. *Journal of Economic surveys* **25** (1), 573–592.
- [43] Marchal, J. : 2008, 'Modélisation des performances thermiques du parc de logements'. Technical report, ANAH.
- [44] Mau, P., J. Eyzaguirre, C. Collins-Dodd, and K. Tiedemann : 2008, 'The "neighbor effect : simulating dynamics in consumer preferences for new vehicle technologies'. *Ecological Economics* **68** (1-2), 504–506.
- [45] Moussaoui, I. : 2009, *Vers une génération de la modération? Pratiques, représentations et systèmes de consommation énergétique selon les âges sociaux*. Consommer autrement.
- [46] Mundaca, L., L. Neij, E. Worrell, and M. McNeil : 2010, 'Evaluating Energy Efficiency Policies with Energy-Economy Models'. *Annual Review of Environmental Resources* **35**, 305–344.
- [47] Nauleau, M. : 2011, 'Modélisation du choix d'entreprendre des travaux de maîtrise énergétique et évaluation du crédit d'impôt à partir de l'enquête ADEME-TNS SOFRES Maitrise de l'énergie'. Master's thesis, Université Paris I.
- [48] Nordhaus, W. D. : 2009, 'The perils of the learning model for modeling endogenous technological change'. *Cowle Foundation discussion paper* **1685**.
- [49] OPEN : 2009, 'Rapport final'. Technical report, OPEN [Observatoire permanent pour l'amélioration énergétique du logement].
- [50] Oreskes, N. : 1998, 'Evaluation (not validation) of quantitative models'. *Environment Health Perspectives* **106** (6), 1453–1460.
- [51] Pelletier, P. : 2011, 'Pour une meilleure efficacité des aides à la performance énergétique'. Technical report, Plan Bâtiment Grenelle.
- [52] PUCA : 2008, 'L'habitat existant contre l'effet de serre, évaluer et faire progresser les performances énergétiques et environnementales des OPAH. Rapport Intermédiaire'. Technical report, PUCA [Plan Urbanisme Construction Architecture].
- [53] Puech, C. : 2009, 'Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois'. Technical report.
- [54] Rehdanz, K. : 2007, 'Determinants of residential space heating expenditures in Germany'. *Energy Economics* **29**(2), 167–182.
- [55] Ürges Vorsatz, D., A. Novikova, S. Köppel, and B. Boza-Kiss : 2009, 'Bottom-up assessment of potentials and costs of CO2 emission mitigation in the buildings sector : insights into the missing elements'. *Energy Efficiency* **2**(4), 293–316.
- [56] Roy, A. : 2007, 'Les pratiques environnementales des Français en 2005'. *Dossier de l'IFEN n°8*.
- [57] Sassi, O., R. Crassous, J.-C. Hourcade, V. Gitz, H. Waisman, and C. Guivarch : 2010, 'IMACLIM-R : a modelling framework to simulate sustainable development pathways'. *International Journal of Global Environmental Issues* **10**(1-2), 5–24.

- [58] Sofres, A. T. : 2010, 'Maîtrise de l'énergie Bilan 2009. Phase 2. Attitudes et comportements des particuliers'. Technical report, ADEME TNS Sofres.
- [59] Sorell, S. and J. Dimitropoulos : 2008, 'The rebound effect : microeconomic definitions, limitations and extensions'. *Ecological Economics* **65**(3), 636–649.
- [60] Sorell, S., J. Dimitropoulos, and M. Sommerville : 2009, 'Empirical estimates of the rebound effect : a review'. *Energy Policy* **37** (4), 1356–1371.
- [61] Subrémon, H. : 2010, 'Etat de la littérature anthropologique sur la consommation d'énergie domestique - en particulier de chauffage'. Technical report, DGALN/PUCA.
- [62] TNSOFRÉS : 2010, 'Maîtrise de l'énergie Bilan 2009'. Technical report, ADEME.
- [63] Train, K. : 1985, 'Discount rates in consumers' energy-related decisions : a review of the literature'. *Energy* **10** (12), 1243–1253.
- [64] Webster, M., S. Paltsev, J. Parsons, J. Reilly, and H. Jacoby : 2008, 'Uncertainty in Greenhouse Gas Emissions and Costs of Atmospheric Stabilization'. Technical report, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change is an organization for research.
- [65] Weiss, M. Juginger, M. Patel, and K. Blok : 2010, 'A review of experience curves analysis for energy demand technologies'. *Technological Forecasting & Social Change* **77** (3), 411–428.
- [66] Young, H. P. : 2009, 'Innovation Diffusion in Heterogeneous Populations : Contagion, Social Influence, and Social Learning'. *American Economic Review* **95** (5), 1899–1924.

## Quatrième partie

# Annexes

## 12 Mise à jour des données

### 12.1 Parc

Cette partie décrit la méthodologie utilisée pour établir le parc de logements de Res-IRF : 26 millions de résidences principales (on ne prend délibérément pas en compte les résidences secondaires et les logements vacants) caractérisées selon trois paramètres :

- L’étiquette énergétique (de G à A)
- L’énergie de chauffage de base (électricité, gaz, fioul ou bois)
- Le “type de décideur” au nombre de cinq (propriétaire occupant en maison individuelle ou en logement collectif, propriétaire bailleur en maison individuel ou en logement collectif (hors logement social) et logement social).

La majorité des informations sont tirées de la base de données de l’ANAH de Julien Marchal<sup>51</sup>, dont certaines segmentations sont plus fines que ce dont nous avons besoin pour Res-IRF (zone climatique et période de construction notamment). Toutefois trois aspects empêchent d’utiliser telle quelle cette base de données pour Res-IRF :

- Hors logement social, pour les logements construits avant 1975 ou après 2000, on ne sait pas si le propriétaire est occupant ou bailleur.
- Concernant les énergies de chauffage, on a une segmentation par électricité, gaz, fioul et “autres” (hors logement social) et électricité, gaz et “fioul et autres” (logement social).
- La base de donnée de l’ANAH couvre les 31 millions de logements de France métropolitaine, sans distinguer s’il s’agit de résidences principales, secondaires, ou de logements vacants.

Les trois prochaines parties décrivent comment traiter ces trois aspects.

#### 12.1.1 Proportion des propriétaires bailleurs et occupants dans les logements construits avant 1975 et après 2000 sur l’ensemble du parc

57% des ménages sont propriétaires<sup>52</sup>, et parmi ceux-ci 79% vivent dans une maison individuelle<sup>53</sup>. On a donc sur *l’ensemble des résidences principales* la répartition (en comptabilisant le logement social)<sup>54</sup> :

$$\begin{pmatrix} PO_{MI} & PO_{LC} \\ PB_{MI} & PB_{LC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 45\% & 12\% \\ 11\% & 32\% \end{pmatrix} \quad (9)$$

où  $PO$  (resp  $PB$ ) signifie propriétaire occupant (resp propriétaire bailleur) et  $MI$  (resp  $LC$ ) maison individuelle (resp logement collectif).

Si on considère que les résidences secondaires et les logements vacants (2,8 millions de maisons individuelles, et 2,1 millions de logements collectifs) appartiennent aux catégories  $PO_{MI}$  et  $PO_{LC}$ , on a la répartition sur *l’ensemble du parc* :

51. MARCHAL J, 2008 Modélisation des performances thermiques du parc de logements, Rapport pour l’ANAH

52. INSEE

53. ANAH Enquête nationale du logement p8 Décembre 2009

54. Cette partition est confirmée par les Comptes du logement en 2007

$$\begin{pmatrix} PO_{MI} & PO_{LC} \\ PB_{MI} & PB_{LC} \end{pmatrix}_{Ref} = \begin{pmatrix} 47\% & 17\% \\ 9\% & 27\% \end{pmatrix} \quad (10)$$

De plus, les 4,5 millions de logements sociaux (qui s'ajoutent aux 16,2 millions de maisons individuelles et 10,4 millions de logements collectifs pour former les 31,1 millions de logements en France métropolitaine) sont à 84% des logements collectifs<sup>55</sup>.

On détermine deux paramètres  $\alpha_{MI}$  et  $\alpha_{LC}$ , représentant la proportion de propriétaires occupants dans les maisons individuelles (respectivement dans les logements collectifs) *datant d'avant 1975 ou d'après 2000*, pour approcher les résultats de 10 (en n'oubliant pas les logements sociaux) par une moyenne pondérée par le nombre de logement. On trouve  $\alpha_{MI} = 85\%$  et  $\alpha_{LC} = 57\%$ .

On fait ensuite l'hypothèse que la proportion de propriétaires occupants dans les maisons individuelles (respectivement dans les logements collectifs) *datant d'avant 1975 ou d'après 2000 est la même quelle que soit l'étiquette et l'énergie de chauffage utilisée*. Cela revient à multiplier par  $\alpha_{MI}$  (respectivement  $\alpha_{LC}$ ) les effectifs de logements sous l'étiquette *MI* (respectivement *LC*) dans la base de l'ANAH pour les faire passer dans l'étiquette  $PO_{MI}$  (respectivement  $PO_{LC}$ ). Tous les logements ont alors un "type de décideur".

### 12.1.2 Suppression des résidences secondaires et logements vacants

Notre parc contient à ce stage 31,1 millions de logements dont 14,6 millions de  $PO_{MI}$  et 5,3 millions de  $PO_{LC}$  (dont respectivement 2,8 millions et 2,1 millions de résidences secondaires et logements vacants), le reste étant réparti entre logements sociaux et propriétaires bailleurs.

On multiplie alors tous les effectifs de logements sous l'étiquette  $PO_{MI}$  (respectivement  $PO_{LC}$ ) par  $\alpha = 1 - \frac{2,8}{14,6} = 81\%$  (respectivement  $\beta = 1 - \frac{2,2}{5,3} = 59\%$ ), quelle que soit l'étiquette et le type de chauffage utilisé. On retombe alors sur un parc de 26 millions de logements, soit le nombre de résidences principales en France métropolitaine.

Il est probable que les résidences secondaires soient moins bien isolées que les résidences principales (on a moins d'incitation à rénover un logement qu'on ne fréquente que quelques semaines par an car le temps de retour sur investissement est nettement plus grand). Il est également probable que les énergies de chauffage n'aient pas la même répartition (peut-être plus de fioul qui reste l'énergie dominante pour les maisons à la campagne). Certains logements vacants sont des logements laissés à l'abandon, dans ce cas on peut émettre les mêmes hypothèses concernant les biais de représentation en matière d'étiquette et d'énergie de chauffage. D'autres en revanche sont en attente d'être vendus, on peut alors penser que ce sont des logements plutôt bien isolés (ou qui vont subir très prochainement des travaux), ayant plus de chance d'être chauffés au gaz ou à l'électricité par exemple.

La dernière catégorie étant moins importante que les deux premières, on peut penser que cette opération entraîne une légère surreprésentation des "mauvaises" étiquettes et du chauffage au fioul.

### 12.1.3 Intégration du bois

**Logements non sociaux** Il existe quatre types d'énergies pour ce type de logement : électricité, gaz, fioul et "autres". Dans le "autres" rentrent donc le charbon, le GPL, le

---

55. Comptes du logement 2007

Poste	MEDIUM	OPTIMAL	Total
Chauffage	266 100	110 800	376 900
Ouverture	613 500	112 400	725 900
Intérieur	179100	73 500	252 600
Toiture	0	163 000	163 000
Total	1 058 700	459 700	1 518 400

TABLE 17 – Rénovations énergétiques dans le bâti en 2006

chauffage urbain, le solaire thermique et ce qui nous intéresse : le bois.

Le bois est une énergie de chauffage utilisée massivement en appoint : nombre de maisons chauffées à l'électricité ou au fioul possède une cheminée utilisée par les habitants selon une fréquence très variable, et pour des raisons parfois autres qu'une stricte augmentation de la température.

Les chiffres clés du bâtiment de l'ADEME (année 2007) donnent le nombre de logements qui utilisent le bois comme énergie de chauffage principale, en maison individuelle et en logement collectif (842 000 et 16 000), permettant avec les autres données d'estimer la part du bois à 88% de la catégorie "autres" dans les maisons individuelles et seulement 2% dans les logements collectifs. Une estimation grossière (860 000 logements fois 250kWh par m2 fois 110 m2 par logement) donne une consommation de 23 TWh, soit environ trois à quatre fois moins que la consommation estimée de bois dans le secteur résidentiel<sup>56</sup>, confirmant que l'utilisation du bois est surtout utilisée en appoint.

Même si la représentation est imparfaite, nous devons nécessairement dans notre modèle considérer uniquement les énergies de chauffage principale. Il est probable que les maisons chauffées principalement au bois se divisent en deux catégories : les maisons très écologiques équipées de poêle à bois sophistiqués et les vieilles maisons.

On fait cependant l'hypothèse nécessaire (faute de données plus précises) que la part du bois est identique quel que soit l'étiquette énergétique et le type de décideur (on pourrait aussi raisonnablement penser que le chauffage au bois soit plus utilisé parmi les propriétaires occupants par exemple).

On "transfère" donc 44% (respectivement 1% pour les logements collectifs) des logements de la catégorie "autre" dans la catégorie bois (à étiquette et type de décideur donné). Les chiffres 88% et 2% ont été divisés par deux car dans la base de données de l'ANAH, la part d'énergie "autres" représente 15% des logements, contre seulement 7% pour l'ADEME (la différence étant captée par les logements chauffés au gaz), et on souhaite au final retomber sur environ 900 000 logements dont l'énergie de chauffage principale est le bois (cf ADEME) et pas le double.

**Logements sociaux** En l'absence de données, on estime à 50% la part du fioul dans "fioul et autres" et 2% celle du bois (comme dans les logements collectifs), en supposant que la majorité restante est du chauffage urbain.

## 12.2 Taux de rénovation initial

L'enquête OPEN permet d'obtenir le tableau 17.

On peut se poser trois questions.

---

56. 87,9 TWh pour le CLIP, 80,2 TWh pour l'ADEME et 75,6 TWh pour le rapport GAP "Le développement du bois énergie : solution durable pour répondre au défi énergétique?"

- Les rénovations MEDIUM entraînent-elles toutes un changement d'étiquette?
- Dans quelle mesure fait-on des travaux sur différents postes à la fois (chauffage+isolation par exemple), correspondant dans notre modèle à un seul travaux?
- Dans quelle mesure toutes ces rénovations s'appliquent-elles à notre parc (elec/gaz/fioul/bois, représentant approximativement 91% du parc total)?

On peut considérer que pour la première question la réponse est positive dans la majorité des cas (les critères MEDIUM sont relativement exigeants).

Pour la deuxième question, G Callonec de l'Ademe suggérerait lors de notre entretien beaucoup plus des petits travaux davantage que de gros chantiers. Il faudrait peut-être éplucher en détail l'enquête OPEN pour avoir plus de renseignements. Sans plus d'informations, on peut estimer à environ à 20% le nombre de travaux affectant plus de deux postes. Pour simplifier, on considère que 30% des travaux sont effectués sur deux postes exactement. Alors il ne faut comptabiliser que 70% des travaux.

Enfin, pour la dernière question, les maisons chauffées au charbon sont souvent les plus rentables à rénover, mais leurs habitants n'ont pas forcément la capacité d'investissement nécessaire pour mener des travaux. On considère donc que la proportion de travaux est la même dans le parc Res-IRF que dans le parc "réel".

On a finalement un taux initial de travaux (il y a au total 26.2 millions de résidences principales) de  $0.7 \times 0.91 \times \frac{1518400}{26200000} \simeq 3\%$ .

### 12.3 Matrice de coûts de rénovation

G Callonec de l'Ademe a établi en sa matrice de coûts de transition en se basant sur des combinaisons de gestes, pour lesquels il a fait un net effort pour déterminer leur prix moyen.

$$M_{ADEME} = \begin{pmatrix} 76 & 141 & 182 & 229 & 304 & 396 \\ 0 & 63 & 105 & 153 & 227 & 320 \\ 0 & 0 & 38 & 88 & 163 & 254 \\ 0 & 0 & 0 & 47 & 122 & 212 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 75 & 167 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 105 \end{pmatrix}$$

Cependant on peut voir avec Excel certaines aberrations, par exemple passer de G à E directement coûte 3% plus cher que de passer de G à F puis de F à E.

Sa matrice est déterminée ex post par aggrégation d'où ces quelques aberrations.

Hormis le passage de G à F qui nécessite un gain énergétique assez conséquent, il est cohérent que cela coûte de plus en plus cher de passer d'une étiquette à la suivante (rendement décroissants). On modifie donc les valeurs de la diagonale (sauf les deux premières) à 70, 79, 93 et 110.

La méthode la plus directe pour remplir les autres cases est de procéder par additivité (le coût pour passer de G à E vaut le coût pour passer de G à F plus celui pour passer de F à E).

Or plus on saute un nombre important d'étiquettes d'un coup, plus on fait d'économie d'échelle et de temps et donc plus la différence de coût relative par rapport à la somme des prix de transitions d'une seule étiquette est importante.

Pour rendre compte de cela on multiplie tous les termes de la surdiagonale<sup>57</sup> de la matrice intermédiaire obtenue par additivité par 0,98 ; ceux de la sursurdiagonale par 0,96

57. correspondant à des sauts de deux étiquettes

et ainsi de suite (jusqu'à 0,9 pour le dernier élément en haut à droite de la matrice). Ces facteurs multiplicatifs sont choisis un peu arbitrairement (il pourrait être intéressant mais à mon avis difficile de les estimer à partir de données).

On obtient finalement la matrice :

$$C_{INV-Existant} = \begin{pmatrix} 76 & 136 & 201 & 271 & 351 & 442 \\ 0 & 63 & 130 & 204 & 287 & 382 \\ 0 & 0 & 70 & 146 & 232 & 331 \\ 0 & 0 & 0 & 79 & 169 & 271 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 93 & 199 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 110 \end{pmatrix}$$

## 12.4 Données introduites suite à l'ajout des logements sociaux et du bois énergie

### 12.4.1 Part des différentes énergies dans la construction neuve

9% pour le bois . Les 91% restants sont répartis dans les mêmes proportions que précédemment (ce qui donne 64% pour l'électricité, 24% pour le gaz et 3% pour le fioul).

Pour le bois on trouve sur les sites de professionnels le chiffre de 250 000 installations de poêles à bois chaque année (sur 500 000 postes de chauffage).

### 12.4.2 Taux d'actualisation dans le logement social

**Existant (rénovations)** Il est choisi à 4%, comme le taux traditionnellement retenu dans le calcul économique public. Comme ce taux est assez bas et qu'on souhaite que la moyenne pondérée des taux d'actualisation soit de 20% (valeur généralement estimée pour les travaux d'efficacité énergétique), il faut réévaluer le taux d'actualisation pour les autres types de décideurs à savoir respectivement de 8%, 15% 45% et 55% pour les  $PO_{MI}$ ,  $PO_{LC}$ ,  $PB_{MI}$  et  $PB_{LC}$ .

**Neuf** Il est de 4% pour les logements sociaux, 7% pour les maisons individuelles et 10% pour les logements collectifs.

### 12.4.3 Taux de rotation annuel dans le logement social (pour obligation rénovation)

Les locataires de logements sociaux sont moins mobiles que les locataires du privé. Le taux de rotation annuel dans le logement social est de 10%, contre 18% dans les logements collectifs du privé (CGDD 2009).

### 12.4.4 Coûts de la construction neuve en fonction des énergies

On retient la matrice suivante :

$$C_{INV_{neuf-ini}} = \begin{pmatrix} 1150 & 1400 & 1700 \\ 1200 & 1350 & 1600 \\ 1270 & 1450 & 1800 \\ 1200 & 1300 & 1600 \end{pmatrix}$$

On rappelle que les colonnes correspondent aux trois types de construction (RT05, BBC et BEPOS) et les lignes aux cinq types d'énergie possible (elec, gaz, fioul, bois).



On se base sur les prix de construction avec gaz : ( 1200 1350 1600 ) issue des données précédentes.

Plus un type d'énergie est peu efficace (le pire étant le fioul), et plus l'exigence de performance énergétique est élevée, plus le coût de construction est grand (car il faut alors des mesures compensatoires onéreuses (isolation excellente, ventilation mécanique contrôlée etc) pour compenser la mauvaise performance de l'énergie).

#### 12.4.5 Coûts de *fuel switch*

On retient la matrice suivante :

$$CCHG = \begin{pmatrix} 0 & 70 & 100 & 120 \\ 50 & 0 & 80 & 100 \\ 55 & 50 & 0 & 100 \\ 55 & 50 & 80 & 0 \end{pmatrix}$$

Le bois reste un type d'énergie cher à l'installation, mais les bénéfices en termes d'efficacité énergétiques sont alors importants. La procédure de choix dans Res-IRF qui dissocie complètement l'efficacité en termes d'étiquette énergétique et le fuel switch ne permet pas d'appréhender cet aspect.

*Une seule hypermatrice de coûts de transition incorporant à la fois l'étiquette énergétique ainsi que l'énergie de chauffage de départ et d'arrivée serait plus pertinente.* C'est le cas de la nouvelle procédure de fuel switch (voir partie 14 page 82). Le remplissage de cette matrice (comportant  $21 \times 4 \times 4 = 176$  termes non nuls car il y a 21 choix pour les rénovations d'étiquette, 4 énergies de départ et 4 énergies d'arrivée) serait délicat. Les données sur les fuel switch sont extrêmement parcellaires et il faudrait en plus les croiser avec les données sur les changements d'étiquette.

Cependant cette matrice a un rôle primordial pour les fuel switch notamment en présence de taxe carbone (ils ont de plus la particularité de ne pas décroître par learning-by-doing).

#### 12.4.6 Part du logement social dans la construction neuve

D'après l'article 55 de la loi n° 2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains (loi SRU), les villes doivent disposer d'au moins 20% de logements sociaux.

C'est la part que l'on prend pour les logements sociaux dans la construction neuve, on répartit les 80% restants dans les mêmes proportions que l'ancienne version du modèle (cela donne 29% pour  $PO_{MI}$ , 19% pour  $PB_{MI}$ , 13% pour  $PO_{LC}$  et 19% pour  $PB_{LC}$ ).

#### 12.4.7 Prix du combustible bois

Le prix du bois-énergie en 2007 est estimé à 4 centimes d'euros par kWh. Il s'agit d'une moyenne : les bûches tournant autour de 2 à 3 centimes et les granulés et plaquettes forestières aux environs de 6 à 8 centimes, les disparités régionales étant elles-mêmes très fortes (ADEME 2009).

#### 12.4.8 Paramètres régissant l'évolution de la surface des logements sociaux dans la construction neuve

L'élasticité de la surface par rapport au revenu est prise identique à celui des logements collectifs : 0,01.

On considère que les logements sociaux sont en moyenne légèrement plus petits que les logements collectifs.

La surface moyenne dans l'existant est prise à 60 m<sup>2</sup> (contre 66m<sup>2</sup> dans les logements collectifs). Pour le neuf, la surface initiale est prise à 65m<sup>2</sup> (70m<sup>2</sup> pour les LC) et la surface maximale à 75m<sup>2</sup> (80m<sup>2</sup> pour les LC).

#### 12.4.9 Contenu CO2

Pour le bois, le contenu marginal et moyen est pris à zéro.

#### 12.4.10 Coefficients de conversion Energie Primaire/Energie Finale

On le prend à 1 pour le bois (2.58 pour l'électricité et 1 pour le gaz et le fioul).

L'énergie grise n'est donc pas comptabilisée, comme c'est le cas pour les autres énergies.

### 13 Calibrage des coûts intangibles

Les coûts intangibles sont ajoutés au coûts totaux sur le cycle de vie pour faire correspondre transitions énergétiques endogènes et transitions énergétiques réelles.

Lorsque tous les autres paramètres sont fixés ( $CENER^{58}$ ,  $CINV$ ,  $\nu$ ), les transitions énergétiques sont une fonction des coûts intangibles :

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{T}^+(n) & \rightarrow & \mathcal{T}^U(n) \\ IC & \mapsto & PR = F_{CENER, CINV, \nu}(IC) \end{array}$$

$F$  est la composée des deux fonctions déterminées par les équations (3) et (2) page 20.  $\mathcal{T}^+(n)$  signifie l'espace des matrices triangulaires supérieures de taille  $n$  (à savoir ici le nombre d'étiquettes moins un), à coefficients positifs (on impose aux  $IC$  d'être positifs).  $\mathcal{T}^U(n)$  signifie l'espace des matrices triangulaires supérieures à coefficients positifs dont la somme sur chaque ligne fait un (en partant d'une étiquette  $i$  la somme des transitions énergétiques sur les étiquettes  $j > i$  fait un).

L'objectif est donc de trouver  $IC^* \epsilon \mathcal{T}^+(n)$  tel que

$$F_{CENER, CINV, \nu}(IC^*) = PR_{objectif} \quad (11)$$

avec

$$PR_{objectif} = \begin{pmatrix} 25\% & 27\% & 27\% & 21\% & \varepsilon\% & \varepsilon\% \\ & 40\% & 26\% & 31\% & 2\% & \varepsilon\% \\ & & 66\% & 28\% & 6\% & \varepsilon\% \\ & & & 95\% & 5\% & \varepsilon\% \\ & & & & 91\% & 9\% \\ & & & & & 100\% \end{pmatrix}$$

Le système (11) est un système d'équations non-linéaires sous-déterminé :  $\mathcal{T}^U(n)$  est en fait de la même "taille" que  $\mathcal{T}^+(n-1)$  (sur une ligne, si toutes les conditions sauf une sont réalisés, la dernière l'est automatiquement car la somme sur la ligne fait un).

---

58. taux d'actualisation à 20%,

On cherche  $IC^*$  de la forme :

$$IC^* = \begin{pmatrix} * & \cdots & \cdots & * \\ & \ddots & & \vdots \\ & & * & * \\ & & & 0 \end{pmatrix}$$

En effet partant de l'étiquette B, la seule étiquette d'arrivée possible est A, par conséquent il est ici superflu de rajouter des coûts intangibles sur cette transition.

On rajoute une condition par ligne  $i$  :

$$\sum_{j>i} PR_{i,j} IC_{i,j} = \lambda \sum_{j>i} PR_{i,j} LCC_{i,j}$$

La raison est double : d'une part cela permet d'avoir un système bien déterminé, d'autre part ce la permet de contrôler la valeur des coûts intangibles.

En effet cette condition impose que pour chaque étiquette de départ, en moyenne, les coûts intangibles représentent une fraction  $\lambda$  du coût total sur le cycle de vie.

Le système est complexe et la résolution est instable (le solveur Scilab doit appliquer un algorithme type gradient qui ne prend pas bien en compte les spécificités de ce problème). A la première tentative de résolution,  $\lambda$  vaut 10%, puis est augmenté en cas d'échec de 1%, jusqu'à ce que la calibration réussisse<sup>59</sup>. Au final, la valeur de  $\lambda$  est située entre 20% et 30%.

## 14 Piste d'amélioration de la procédure de fuel switch

L'objectif est de réaliser en une seule étape ce qui se faisait précédemment en deux : à type de décideur donné, on passe directement d'un couple  $(q_i, e_i)$  à un couple  $(q_f, e_f)$ .

La proportion de logements  $(d, q_i, e_i)$  passant dans la catégorie  $(d, q_f, e_f)$  notée  $PR_{d,(q_i,e_i) \rightarrow (q_f,e_f)}$  est donnée par la formule :

$$PR_{d,(q_i,e_i) \rightarrow (q_f,e_f)} = \frac{LCC_{d,(q_i,e_f) \rightarrow (q_f,e_f)}^{-\nu}}{\sum LCC_{d,(q_i,e_f) \rightarrow (q_f,e_f)}^{-\nu}}$$

avec

$$LCC_{d,(q_i,e_f) \rightarrow (q_f,e_f)} = CENER_{(d,q_f,e_f)} + CRENO_{(q_i,e_f) \rightarrow (q_f,e_f)} + IC_{(q_i,e_f) \rightarrow (q_f,e_f)}$$

La matrice  $CRENO$  est assez difficile à déterminer faute de données, mais peut être obtenue de façon grossière dans un premier temps en combinant les matrices précédentes de coûts de changement d'étiquette et de coûts de fuel switch.

Ce changement simple en apparence induit en réalité un profond changement dans la calibration des coûts intangibles et la décroissance des coûts.

### 14.1 Calibrage des coûts intangibles

A partir de l'hypermatrice  $PR_{(q_i,e_i) \rightarrow (q_f,e_f)}$ , on peut déterminer deux matrices par aggrégation  $PR_{ag,étiquette}$  et  $PR_{ag,fuelswitch}$  :

$$PR_{ag,étiquette}(i, j) = \frac{1}{nbtypechauffage} \sum_{e_i, e_j} PR_{(i,e_i) \rightarrow (j,e_j)} \quad \forall i < j$$

---

<sup>59</sup>. De façon intuitive, augmenter  $\lambda$  augmente l'espace des possibles pour les  $IC$  donc facilitent la résolution

et

$$PR_{ag,fuelswitch}(e_i, e_j) = \frac{1}{nb_{\text{étiquettes}}} \sum_{i < j} PR_{(i,e_i) \rightarrow (j,e_j)} \quad \forall e_i \forall e_j$$

La première matrice donne les market shares des changements d'étiquette, indépendamment des fuel switch. La deuxième les market shares des fuel switch, indépendamment des changements d'étiquette.

Les coûts intangibles doivent permettre, suite à la procédure de rénovation, de faire coïncider les market share endogènes avec les market shares observés. On doit donc trouver  $IC_{(q_i, e_i) \rightarrow (q_f, e_f)}$  tel que

$$\begin{cases} PR_{ag,\text{étiquette},ini} = PR_{ag,\text{étiquette},réels} \\ PR_{ag,fuelswitch,ini} = PR_{ag,fuelswitch,réels} \end{cases} \quad (12)$$

Où  $PR_{ag,\text{étiquette},réels}$  est la même matrice que précédemment, et  $PR_{ag,fuelswitch,réels}$  une matrice à déterminer à partir de données réelles, que l'on peut fixer provisoirement à

$$PR_{ag,fuelswitch,ini} = \begin{pmatrix} 95\% & 3\% & 5\% & 1.5\% \\ 1\% & 97.5\% & 5\% & 1\% \\ 2\% & 3\% & 93\% & 2\% \\ 1\% & 1\% & 0.5\% & 97.5\% \end{pmatrix}$$

(en ligne l'énergie de départ et en colonne l'énergie d'arrivée, l'ordre des énergies étant élec, gaz, fioul, bois).

On réussit à atteindre l'objectif en cherchant  $IC$  sous la forme :

$$IC_{(i,e_i) \rightarrow (j,e_j)} = IC_{\text{étiquettes}}(i, j) + IC_{fuelswitch}(e_i, e_j)$$

avec une méthode similaire à précédemment.

## 14.2 Evolution des coûts intangibles et des coûts de rénovation

Ces derniers décroissent chaque année par un processus de *learning-by-doing*.

Chaque année on sauvegarde :

- La surface rénovée selon l'étiquette d'arrivée : il s'agit de l'augmentation du stock de capital installé relatif aux étiquettes  $\Delta K_{\text{étiquette}}$  (vecteur allant de l'étiquette F à l'étiquette A).
- La surface rénovée selon l'énergie d'arrivée, *s'il y a eu fuelswitch*, auquel *on ajoute la surface dans la construction neuve selon l'énergie* : il s'agit de l'augmentation du stock de capital installé relatif au fuel switch  $\Delta K_{fuelswitch}$  (vecteur de taille du nombre de type de chauffage soit 4).

$$CRENO_{ini,(i,e_i) \rightarrow (j,e_j)} = \begin{cases} CRENO_{ini,(i,e_i) \rightarrow (j,e_j)} \times LBD_{\text{étiquette}} & \text{si } e_i = e_j \\ CRENO_{ini,(i,e_i) \rightarrow (j,e_j)} \times \frac{LBD_{\text{étiquette}} + LBD_{fuelswitch}}{2} & \text{si } e_i \neq e_j \end{cases}$$

Avec  $LBD_{\text{étiquette}}$  et  $LBD_{fuelswitch}$  calculés à partir de  $K_{\text{étiquette}}$  et  $K_{fuelswitch}$ .